



Instituto Politécnico de Viana do Castelo
Escola Superior Agrária de Ponte de Lima

**Modelação do clima em estufa climatizada para produção e
enraizamento de estacas de *Eucalyptus globulus* Labill.**

Dissertação
Mestrado em Agricultura Biológica

Mário João de Sousa Louro

Ponte de Lima, Julho 2011



Instituto Politécnico de Viana do Castelo
Escola Superior Agrária de Ponte de Lima

**Modelação do clima em estufa climatizada para produção e
enraizamento de estacas de *Eucalyptus globulus* Labill.**

Dissertação
Mestrado em Agricultura Biológica

Mário João de Sousa Louro

Orientadora: Professora Doutora Isabel de Maria C. G. Mourão
Co-orientadora: Professora Doutora Fátima de Jesus Fôlgoa Baptista

Ponte de Lima, 2011

DECLARAÇÃO

Nome: Mário João de Sousa Louro

E-mail: mario.louro@vodafone.pt

B. I.: 10404706

Título da Dissertação:

Modelação do clima em estufa climatizada para produção e enraizamento de estacas de *Eucalyptus globulus* Labill.

Orientadora:

Professora Doutora Isabel de Maria C. G. Mourão

Co-Orientador:

Professora Doutora Fátima de Jesus Fôlgoa Baptista

Designação do Mestrado:

Mestrado em Agricultura Biológica

Ano de Conclusão: 2011

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA TESE APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.

Escola Superior Agrária de Ponte de Lima / IPVC, 29/07/2011

Assinatura:_____

As doutrinas expressas neste
trabalho são da exclusiva
responsabilidade do autor

Dedicatória

À minha esposa e filhos

AGRADECIMENTOS

E primeiro lugar gostaria de agradecer à Professora Doutora Isabel Mourão, pelo convite efectuado para a inscrição neste mestrado, dedicada e responsável coordenadora, e finalmente pela determinação e empenho que desempenhou na orientação deste trabalho.

À minha esposa pela forma como aceitou este desafio, o enorme apoio e ajuda prestada durante as minhas ausências físicas e psicológicas.

À Altri Florestal de forma geral e especialmente à gestora do I&D, Eng.^a Clara Araújo, pela autorização e disponibilização de tempo para a frequência da parte curricular deste curso.

À Doutora Lucinda Neves, pelo apoio dado durante a realização deste mestrado e, pela sobrecarga de trabalho que ficou durante as minhas ausências.

À Professora Doutora Fátima Baptista, pela forma, empenho, dedicação e disponibilidade que prestou neste trabalho, permitindo que se conseguisse chegar ao final com sucesso.

Ao Professor Doutor Juan Majada, pela ajuda e indicação da metodologia a seguir para a verificação da influência das condições ambientais nos processos produtivos.

Ao Professor Doutor Miguel Brito, pela ajuda e revisão dos tratamentos estatísticos efectuados.

A todos os colegas e docentes, que proporcionaram, para além de um excelente grupo de trabalho, um excelente grupo de amigos.

À “Canhota” e “Gibreliana”, pela forma singular como me ajudaram a espairecer e limpar o raciocínio, durante algumas partes mais problemáticas deste trabalho.

À Bella, o biblout, pela fiel companhia durante as longas noites e pelas travessuras efectuadas durante as trocas de correio.

A todos aqueles que de forma directa ou indirecta contribuíram para a realização deste trabalho.

ÍNDICE

Agradecimentos.....	i
Índice.....	ii
Resumo.....	vi
ABSTRACT.....	viii
lista de abreviaturas e símbolos.....	x
lista de quadros.....	xiii
lista de figuras	xv
1 - Introdução	1
2 - Modelação do clima em estufa climatizada	3
2.1 - Introdução	3
2.1.1 - Variáveis climáticas	3
2.1.1.1 - Radiação.....	3
2.1.1.2 - Temperatura	4
2.1.1.3 - Humidade	6
2.1.2 - A modificação do ambiente em estufas	7
2.1.2.1 - Estufas e materiais	8
2.1.2.2 - Sistemas de arrefecimento	9
Ventilação.....	9
Ventilação natural	9
Ventilação forçada.....	12
Arrefecimento evaporativo.....	13
Painel evaporativo	13
Nebulização	15
Utilização de rede/ecrãs	16
2.1.2.3 - Sistemas de aquecimento	17
Aquecimento por convecção	19
Aquecimento por radiação - convecção	21
Aquecimento do solo por condução	21

2.1.2.4 - Sistemas de controlo do clima em estufas.....	21
2.1.3 - Modelação do clima – Balanços de energia e massa	23
2.1.3.1 - Balanços de energia.....	25
Ganhos de calor devidos ao sistema de aquecimento.....	28
Ganhos de calor devidos à radiação solar.....	29
Coeficiente de perdas de calor pela cobertura	29
Perdas de calor pelas janelas	30
Perdas de calor por ventilação dinâmica	30
Conversão do calor sensível em calor latente por evaporação de água do sistema de nebulização	30
Conversão do calor sensível em calor latente por evaporação de água do painel evaporativo	31
2.1.3.2 - Balanços de massa.....	32
Concentração de vapor no interior da estufa	34
Ganhos de vapor de água por transpiração das culturas.....	34
Perdas de humidade relativo a fluxos de calor sensível	35
Ganhos de humidade relativos a fluxos de calor latente.	35
2.2 - Material e métodos	37
2.2.1 - Estufas e materiais.....	37
2.2.1.1 - Ventilação natural e dinâmica	39
2.2.1.2 - Arrefecimento evaporativo.....	40
2.2.1.3 - Humidificação	40
2.2.1.4 - Controlo da radiação solar	40
2.2.1.5 - Aquecimento	41
2.2.1.6 - Controlo dos equipamentos e sensores.....	41

2.2.1.7 - Recolha de dados	42
2.2.3 - Balanços de energia e massa.....	43
2.2.3.1 - Balanços de energia	44
Extracção dos coeficientes e ajustes do balanço de energia.....	45
Ganhos de calor devidos ao sistema de aquecimento	46
Ganhos de calor devidos à radiação solar	47
Perdas de calor pela cobertura.....	47
Perdas de calor pelas janelas	47
Perdas de calor por ventilação dinâmica.	49
Perdas de calor por evaporação de água do sistema de nebulização.....	49
Perdas de calor por evaporação de água do painel evaporativo	50
Capacidade de calorífica da estufa	51
2.2.3.2 - Balanços de massa	51
Extracção dos coeficientes e ajustes do balanço de massa.....	52
Ganhos de vapor de água relativo à evapotranspiração	52
Ganhos de vapor de água relativos a fluxos de calor latente	52
Perdas de vapor de água relativo a fluxos de calor sensível	53
2.2.4 - Análise de dados e validação dos modelos	53
2.3 - Resultados e discussão.....	55
2.3.1 - Resultados da extracção dos coeficientes e ajustes do modelo.....	55
2.3.1.1 - Modelo de aquecimento	55
2.3.1.2 - Modelo de arrefecimento	57
2.3.1.3 - Modelo único	60
2.3.2 - Resultados da validação do modelo.....	60

2.3.2.1 - Modelo de aquecimento	60
2.3.2.2 - Modelo de arrefecimento	64
2.3.2.3 - Modelo único	67
2.4 - Conclusões	71
3 - Influência do controlo ambiental na produção e enraizamento de miniestacas de <i>Eucaliptus glObulos</i> Labill.....	73
3.1 - Introdução	73
3.1.1 - Localização do viveiro	74
3.1.2 - Enraizamento de plantas lenhosas.....	75
3.1.4 - Gestão do parque de pés-mãe.....	77
3.1.5 - Gestão da zona de enraizamento	78
3.2 - Material e métodos	79
3.2.1 - Estufas	79
3.2.1 - Produção e enraizamento de estacas	81
3.2.3.- Recolha dos dados.....	82
3.2.3 - Análise de dados	87
3.3.1 - Influência das condições climáticas da estufa de pés-mãe.....	89
3.3.1.1 - Influência na produção de rebentos.....	89
3.3.1.2 – Influências climáticas no enraizamento dos rebentos.....	98
3.3.2 - Resultados da estufa de enraizamento.....	106
3.4.-Conclusões	114
4.- conclusões finais	116
Recomendações e Sugestões para o Futuro	118
Referências Bibliográficas.....	119
Anexos	123

RESUMO

O controlo ambiental em culturas protegidas assume uma grande importância e, a par da rega e da nutrição, é um dos factores limitantes do crescimento e desenvolvimento das plantas. A eficácia deste controlo pode ser avaliada pela utilização de modelos matemáticos. Estes modelos de previsão das condições climáticas interiores, após a sua validação, permitem a simulação para diferentes condições climáticas exteriores e/ou diferentes estratégias de funcionamento dos equipamentos. O presente trabalho permitiu encontrar as condições ambientais favoráveis para a maximização da produção de rebentos nos pés-mãe e do enraizamento de miniestacas de *Eucalyptus globulus* Labill. e, ainda, a definição de objectivos e de estratégias de programação ambiental mais eficientes.

O trabalho foi desenvolvido numa estufa do tipo “Venlo” em vidro, equipada para a propagação clonal de *Eucalyptus globulus* Labill. pela técnica de miniestacaria, localizada nos Viveiros do Furadouro, Grupo Altri, em Óbidos. O desenvolvimento dos modelos climáticos incluiu a realização de balanços de energia e de massa, que permitem simular a temperatura e a humidade relativa no interior da estufa em função dos dados climáticos exteriores, do tipo de estufa, do tipo de cobertura e dos equipamentos existentes. A determinação das condições favoráveis à produção de rebentos e enraizamento de quatro clones, foi realizada através de uma análise multivariada de componentes principais. Efectuou-se ainda uma análise de regressão para as variáveis mais explicativas.

Foram propostos e validados dois modelos, o modelo de aquecimento e o de arrefecimento, obtendo-se diferenças absolutas entre os valores de temperatura e de humidade relativa medidos e simulados, respectivamente, de 0,98 e 1,31°C e de 6,78 e 7,46%. Concluiu-se que existe uma grande influência das condições ambientais na propagação vegetativa de *Eucalyptus globulus* Labill.. Na estufa de pés-mãe, no período de quatro semanas que antecederam a colheita, os valores de radiação solar global de 5,0 e 5,7 MJ m⁻² d⁻¹ e de défice da pressão de vapor de 0,80 e 0,85 kPa, resultaram numa maior produtividade de rebentos dos clones AC58 e GM258, que variou entre 70,0 e 81,0 rebentos m⁻² semana⁻¹. A máxima percentagem de enraizamento de 74,9% e de 62,1%, respectivamente para os clones AC58 e GM258, foram obtidas para valores de temperatura média do ar de 23,5°C e de 25,2°C, no período das quatro semanas após a preparação das miniestacas para

enraizamento. Os clones BC422 e YG15 apresentaram uma menor dependência da propagação vegetativa com as condições ambientais. A interação entre as condições favoráveis de propagação vegetativa e a possibilidade de prever as condições climáticas no interior das estufas, resulta na possibilidade de testar e simular diferentes estratégias de programação dos equipamentos, permitindo a máxima produtividade com o menor consumo de energia.

Palavras-chave: Balanço de energia, balanço de massa, *Eucalyptus globulus*, modelos climáticos, produção de rebentos, enraizamento.

ABSTRACT

The environmental control in protected crops is the outmost importance and, along with irrigation and nutrition, is one of the factors limiting the growth and development of plants. The effectiveness of this control can be assessed by the use of mathematical models to predict the inside conditions and, after its validation, to simulate its behavior for different outside climatic conditions and/or for different alternatives to achieve the equipment set points. This study aimed to find the optimum environmental conditions to maximize minicuttings production and rooting of minicuttings of *Eucalyptus globulus* Labill. and also, setting goals and strategies of more efficient environmental control, in a greenhouse controlled with a proportional environmental control system.

The study was conducted in a "Venlo" greenhouse covered with glass, equipped for the vegetative propagation of *Eucalyptus globulus* Labill. through minicuttings, located in Viveiros do Furadouro, Altri Group, in Óbidos, Portugal. The development of climate models for the prediction of temperature and humidity inside the greenhouse was based on energy and mass balances, as a function of the outside climate data, the type of greenhouse, the cover material and the environmental control equipment. To determine the optimum conditions for the vegetative propagation of four clones, a multivariate analysis was performed for the key components. For the more explanatory environmental variables of the process, a regression analysis was carried on.

Two models were developed and validated, the model of heating and of cooling, resulting in absolute differences between the values of temperature and relative humidity measured and simulated, respectively, of 0.98 and 1.31°C and of 6.78 and 7.46%. It was concluded that there is a great influence of the environmental conditions in the vegetative propagation of *Eucalyptus globulus* Labill.. In the greenhouse unit for minicutting production, during the four weeks prior to harvest, solar radiation values of 5.0 and 5.7 MJ m⁻² d⁻¹ and the vapour pressure deficit of 0.80 and 0.85 kPa, resulted in a greater productivity of minicuttings for clones AC58 and GM258, which ranged between 70.0 and 81.0 shoots m⁻² week⁻¹. The maximum rooting percentages of 74.9% and 62.1% was obtained for values of mean air temperature of 23.5°C and 25.2°C, respectively, for clones AC58 and GM258, during the rooting period of four weeks. The clones BC422 and YG15 had a lower

dependence of the environmental conditions on their vegetative propagation. The interaction between the optimum environmental conditions for vegetative propagation and the ability to predict climatic conditions inside the greenhouse, results in the possibility to test and simulate different control strategies of the available equipment, allowing for maximum productivity with lower power consumption.

Keywords: Energy balance, mass balance, *Eucalyptus globulus*, climate models, production of cuttings, rooting.

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A_1	evapotranspiração relacionada com a radiação solar, $\text{g kg}^{-1} \text{W}^{-1} \text{m}^2 \text{h}^{-1}$
A_2	evapotranspiração relacionada com a radiação solar, $\text{g kg}^{-1} \text{W}^{-1} \text{m}^2$
AA	activação do sistema de aquecimento, %
A_e	área da estufa, m^2
A_j	área de janelas, m^2
AN	activação do sistema de nebulização, %
AP	activação do sistema de arrefecimento (painel húmido), %
AR	activação das redes térmicas/sombra, %
AV_e	activação da ventilação dinâmica do compartimento enraizamento, %
AV_t	activação da ventilação dinâmica do compartimento transição, %
B_1	evapotranspiração relacionada com a diferença concentração de humidade, h^{-1}
B_2	evapotranspiração relacionada com o DPV, $\text{g kg}^{-1} \text{kPa}^{-1}$
C	capacidade de armazenamento térmico da estufa, $\text{W m}^{-2} \text{°C}^{-1}$
C_a	concentração de vapor de água, g kg^{-1}
C_{ae}	concentração de vapor no exterior da estufa, g kg^{-1}
C_{ai}	concentração de vapor no interior da estufa, g kg^{-1}
C_{ais}	concentração de vapor interior simulada, g kg^{-1}
$C_{ai(t-1)}$	concentração de vapor no instante anterior, g kg^{-1}
C_{ai}^*	concentração vapor interior saturado, g kg^{-1}
CA	caudal de água evaporada, $\text{kg h}^{-1} \text{m}^{-2}$
CA_n	caudal de água evaporada pelo sistema nebulização, $\text{kg h}^{-1} \text{m}^{-2}$
C_d	coeficiente de descarga, adimensional
C_p	calor específico do ar, $1005 \text{ J kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$
C_v	coeficiente global de pressão do vento, adimensional
CV	caudal de ventilação, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$
DPV	deficit de pressão de vapor, kPa
e_a	concentração de vapor actual, kPa
e_{ae}	a pressão de vapor actual exterior, kPa
e_{ai}	a pressão de vapor actual interior, kPa
e_p	pressão de vapor de água que sai do painel evaporativo, kPa
e_s	concentração de vapor saturado, kPa
$e(T_{ebh})$	pressão de vapor à temperatura do bolbo húmido, kPa
E_c	perdas de água por condensação, $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$
E_e	concentração de vapor de água no ar da estufa, $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$
E_{la}	fluxo de vapor de água ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
E_n	ganhos de água por nebulização, $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$
E_t	transpiração da cultura, $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$
E_v	perdas de água por ventilação, $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$
FP	factor de correcção da potência dos termoventiladores, adimensional
g	aceleração da gravidade, $9,8 \text{ m s}^{-2}$), a
h_j	altura vertical da janela, m
H	altitude, m
HR	humidade relativa, %

J_l	aberturas laterais, m^2
J_t	área de ventilação total, m^2
J_z	aberturas zenitais, m^2
JN	activação das janelas viradas a nascente, %
JP	activação das janelas viradas a poente, %
K_1	perdas humidade pela estrutura, $g\ kg^{-1}\ g^{-1}\ kg\ h^{-1}$
K_2	perdas humidade pelas janelas, $g\ kg^{-1}\ g^{-1}\ kg\ h^{-1}$
MSE	erro quadrático médio (EQM)
P	pressão atmosférica, $\approx 101,3\ kPa$
PAR	radiação fotossinteticamente activa
Q_a	ganhos pelo sistema de aquecimento, $W\ m^{-2}$
Q_{cc}	perdas por condução e convecção $W\ m^{-2}$
Q_{cs}	perdas de condução pelo solo, $W\ m^{-2}$
Q_e	ganhos devido a equipamentos e máquinas, $W\ m^{-2}$
Q_f	perdas por fotossíntese, $W\ m^{-2}$
Q_{Rs}	ganhos por incidência de radiação solar, $W\ m^{-2}$
Q_j	perdas pelas janelas, $W\ m^{-2}\ ^\circ C^{-1}$
Q_{la}	perdas de calor latente, $W\ m^{-2}$
Q_n	perdas de calor latente pelo sistema de nebulização, $W\ m^{-2}$
Q_p	perdas de calor latente pelo painel evaporativo, $W\ m^{-2}$
Q_r	ganhos por respiração das plantas, $W\ m^{-2}$
Q_{rt}	perdas de radiação térmica, $W\ m^{-2}$
Q_{se}	perdas de calor sensível, $W\ m^{-2}$
Q_v	perdas de calor por ventilação dinâmica, $W\ m^{-2}$
r	razão de mistura, $kg\ kg^{-1}$
r_x	resistência da ventilação, $s\ m^{-1}$
R	número de renovações de ar, h^{-1}
R_a	constante do gás perfeito, $287,055\ J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$
R_s	radiação solar, $W\ m^{-2}$
RMSE	raiz do erro quadrático médio (REQM)
SE	erro padrão
SD	desvio padrão
t	tempo, h^{-1}
T	temperatura do ar, $^\circ C$
T_{bs}	temperatura do bolbo seco, $^\circ C$
T_{bh}	temperatura do bolbo húmido, $^\circ C$
T_e	temperatura exterior, $^\circ C$
T_i	temperatura interior, $^\circ C$
T_{is}	temperatura interior simulada, $^\circ C$
T_e°	temperatura absoluta exterior, $^\circ Kelvin$
U	perdas globais de energia pela cobertura, $W\ m^{-2}\ ^\circ C^{-1}$
V_a	volume de ar trocado, $m^3\ m^{-2}\ h^{-1}$
V	volume da estufa, m^3
V_e	volume específico, $m^3\ kg^{-1}$
V_g	volume da estufa, $m^3\ m^{-2}$
V_v	velocidade do vento, $m\ s^{-1}$
VE	caudal de ventilação compartimento enraizamento, $m^3\ h^{-1}$

VT	caudal de ventilação do compartimento transição, $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$
x	valores do eixo das abcissas
X_a	quantidade de vapor do ar actual
X_s	quantidade máxima de água do ar no ponto de saturação
y	valores do eixo das ordenadas
Y	coeficiente de ventilação da sonda, $\text{m s}^{-1} \text{°C}^{-1}$
Z	altura média da estufa (m)
α, β	coeficientes da evapotranspiração, adimensional
ε	representa a importância relativa das áreas das aberturas zenitais ($J_z \text{-m}^2$)
ΔT	diferença entre a temperatura interior e exterior, °C
ξ	coeficiente de resistência da abertura, adimensional
λ	calor latente de vaporização, J kg^{-1} ou MJ kg^{-1}
τ	transmissibilidade do material da cobertura, adimensional
b	radiação solar convertida em calor sensível, adimensional
μ	massa volúmica do ar, $1,225 \text{kg m}^{-3}$
ρ	representa a densidade do ar, kg m^{-3}
γ	constante, $\approx 0,0667 \text{kPa °C}^{-1}$
η	eficiência do painel evaporativo, adimensional
ϕ	razão dos pesos moleculares do vapor de água/ar seco, 0,622
Φ	equações de ajuste do modelo, adimensional
Φ_a	equações de ajuste do sistema de aquecimento, adimensional
Φ_{A2}	equações de ajuste da evapotranspiração relacionada com a radiação solar, $\text{g kg}^{-1} \text{W}^{-1} \text{m}^2$
Φ_{B2}	equações de ajuste da evapotranspiração relacionada com o DPV, $\text{g kg}^{-1} \text{kPa}^{-1}$
Φ_{cc}	equações de ajuste das perdas pela cobertura, adimensional
Φ_{Ce}	equações de ajuste da capacidade calorífica da estufa, adimensional
Φ_{Rs}	equações de ajuste dos ganhos de energia da radiação solar, adimensional
Φ_u	equações de ajuste do coeficiente U, adimensional
Φ_j	equações de ajuste das perdas pelas janelas, adimensional
Φ_n	equações de ajuste das perdas pela nebulização, adimensional
Φ_v	equações de ajuste das perdas pelos ventiladores, adimensional
Φ_p	equações de ajuste das perdas do sistema de arrefecimento, adimensional
Ψ_e	perdas de vapor pela cobertura, g kg^{-1}
Ψ_j	perdas de vapor pelas janelas, g kg^{-1}
Ψ_n	ganhos de água por nebulização, g kg^{-1}
Ψ_p	ganhos de água pelo painel evaporativo, g kg^{-1}
Ψ_e	perdas de vapor pela cobertura, g kg^{-1}
Ψ_{se}	perdas de humidade devido a fluxos de calor sensível, g kg^{-1}

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 - Coeficientes de efeito do vento determinados por diversos autores para estufas. Adaptado de Baptista e Cruz (2007).	11
Quadro 2.2 - Coeficientes de descarga determinados por diversos autores. Adaptado de Baptista e Cruz (2007).	11
Quadro 2.3 - Equações de ajustamento dos coeficientes e respectivos valores de ajuste, em função do estado de abertura de redes, para o modelo de aquecimento (valores com a mesma letra não são estatisticamente diferentes, $P > 0,05$).	56
Quadro 2.4 - Equações de ajustamento dos coeficientes e respectivos valores de ajuste, em função do estado de abertura de redes, para o modelo de arrefecimento (valores com a mesma letra não são estatisticamente diferentes, $P > 0,05$).	58
Quadro 2.5 - Equações de ajustamento dos coeficientes e respectivos valores de ajuste, em função do estado de abertura de redes, para o modelo único.	60
Quadro 2.6 - Resultados da análise estatística do modelo de aquecimento (média \pm desvio padrão, SD). (*) Indica diferenças significativas ($P < 0,05$) entre os valores medidos e simulados.	61
Quadro 2.7 - Resultados da análise estatística do modelo de arrefecimento (média \pm desvio padrão, SD). (*) Indica diferenças significativas ($P < 0,05$) entre os valores medidos e simulados.	65
Quadro 2.8 - Resultados da análise estatística do modelo único (média \pm desvio padrão, SD). (*) Indica diferenças significativas ($P < 0,05$) entre os valores medidos e simulados.	68
Quadro 2.9 - Medidas de ajustamento do modelo único, considerando a validação com os valores médios ou com os valores dos dois modelos separadamente.	69
Quadro 2.10 - Resultados da análise estatística dos dados do período de aquecimento - modelo único (média \pm desvio padrão, SD). (*) Indica diferenças significativas ($P < 0,05$) entre os valores medidos e simulados.	70
Quadro 2.11 - Resultados da análise estatística dos dados do período de arrefecimento - modelo único (média \pm desvio padrão, SD). (*) Indica diferenças significativas ($P < 0,05$) entre os valores medidos e simulados.	70
Quadro 3.1 - Variância extraída pelas 2 componentes principais para a produção dos quatro materiais vegetativos em estudo (B KMO boa (0,8 a 0,9); C KMO média (0,7 a 0,8)	94

Quadro 3.2 - Variância extraída pelas 2 componentes principais para a produção de estacas dos clones AC57 e GM258 (B KMO boa (0,8 a 0,9); C KMO média (0,7 a 0,8); D KMO razoável (0,6 a 0,7)).	95
Quadro 3.3 - Variância extraída pelas 2 componentes principais para a produção estacas dos clones BC422 e YG15 (^C KMO média (0,7 a 0,8); ^D KMO razoável (0,6 a 0,7); ^E KMO má (0,5 a 0,6)).	97
Quadro 3.4 - Variância extraída pelas 2 componentes principais para estudar o efeito das condições climáticas da produção no enraizamento das estacas dos quatro clones (^C KMO média (0,7 a 0,8); ^D KMO razoável (0,6 a 0,7); ^E KMO má (0,5 a 0,6)).	103
Quadro 3.5 - Variância extraída pelas 2 componentes principais para estudar o efeito das condições climáticas da produção no enraizamento dos clones AC58 e GM258 (^C KMO média (0,7 a 0,8); ^D KMO razoável (0,6 a 0,7); ^E KMO má (0,7 a 0,8)).	104
Quadro 3.6 - Variância extraída pelas duas primeiras componentes principais para o enraizamento dos quatro materiais vegetativos em estudo (^C KMO média(0,7 a 0,8); ^D KMO razoável (0,6 a 0,7)).	110
Quadro 3.7 - Variância extraída pelas 2 componentes principais para o enraizamento do clone AC57 e GM258 (C KMO média (0,7 a 0,8); D KMO razoável (0,6 a 0,7)).	111
Quadro 3.8 - Variância extraída pelas 2 componentes principais para o enraizamento do clone BC422 e YG15 (^E KMO má (0,5 a 0,6); ^F KMO inaceitável (< 0,5)).	112

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Evolução da radiação solar ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) ao longo do ano em Almeria (Espanha) e Wageningen (Holanda). Fonte: Castilla, 2001.	4
Figura 2.2 - Sistema de arrefecimento com painel evaporativo (dir.) e ventilação dinâmica (esq.). Fonte: Munters (2000).	14
Figura 2.3 - Evolução da temperatura do ar (2 m) para sistemas de aquecimento a ar e água quente. Fonte: López (2001).	19
Figura 2.4 - Representação da realidade (esquerda) e o respectivo modelo (direita) - Festival Internacional de Jardins 2010, Ponte de Lima.	23
Figura 2.5 - Balanço global de energia numa estufa. Fonte: Zabeltitz, (1999).	26
Figura 2.6 Imagem aérea dos Viveiros do Furadouro Lda. Fonte: Google (2011).	37
Figura 2.7 Bancadas e sistema de movimentação nos Viveiros do Furadouro Lda.	38
Figura 2.8 - Esquema do compartimento de propagação vegetativa nos Viveiros do Furadouro Lda.	39
Figura 2.9 - (a) Temperatura simulada <i>versus</i> medida e (b) diferenças entre temperatura simulada e medida, no modelo de aquecimento.	62
Figura 2.10 (a) Humidade relativa simulada <i>versus</i> medida e (b) diferença entre temperatura simulada e medida no modelo de aquecimento.	62
Figura 2.11 - (a) Défice de pressão de vapor (<i>DPV</i>) calculado com T e HR simulada <i>versus</i> calculado com T e HR medida e (b) diferenças entre <i>DPV</i> simulado e medido, no modelo de aquecimento.	63
Figura 2.12 - Valores medidos e simulados para a temperatura (T, °C) e humidade relativa (HR, %), no período de 21 a 25 de Janeiro de 2010.	64
Figura 2.13 - Temperatura simulada <i>versus</i> medida (a), e diferenças entre temperatura simulada e medida (b) no modelo de arrefecimento.	65
Figura 2.14 - Humidade relativa simulada <i>versus</i> medida (a), e diferença entre temperatura simulada e medida (b) no modelo de arrefecimento.	66
Figura 2.15 - Défice de pressão de vapor (<i>DPV</i>) calculado com T e HR simulada <i>versus</i> calculado com T. e HR medida (a), e diferenças entre <i>DPV</i> simulado e medido (b) no modelo de arrefecimento.	66

Figura 2.16 - Valores medidos e simulados para a temperatura (T - °C) e humidade relativa HR - %) no período de 3 a 7 de Julho de 2010.	67
Figura 2.17 (a) Temperatura simulada <i>versus</i> medida e (b) diferenças entre temperatura simulada e medida, no modelo único.	68
Figura 2.18 - (a) Humidade relativa simulada <i>versus</i> medida e (b) diferença entre temperatura simulada e medida, no modelo único.	68
Figura 2.19 - (a) Défice de pressão de vapor (DPV) calculado com T e HR simulada <i>versus</i> calculado com T e HR medida e (b) diferenças entre DPV simulado e medido, no modelo único.	69
Figura 3.1 - Bancadas com pés-mãe (minitouças) para obtenção de miniestacas de <i>Eucalyptus globulus</i> Labill., nos Viveiros do Furadouro.	80
Figura 3.2 - Zona de enraizamento de estacas de <i>Eucalyptus globulus</i> Labill., nos Viveiros do Furadouro.	80
Figura 3.3 - Produção de rebentos (número de rebentos m ⁻² semana ⁻¹) ao longo das semanas do ano de 2010, nos Viveiros do Furadouro.	82
Figura 3.4 - Percentagem de enraizamento das estacas (% enraizamento semana ⁻¹) ao longo das semanas do ano de 2010, nos Viveiros do Furadouro.	82
Figura 3.5 - Sedimentação das componentes principais da relação entre os dados climáticos da estufa dos pés-mãe e o seu efeito na produção de rebentos.	90
Figura 3.6 - Extracção da variância explicada em duas componentes, para a avaliação do efeito dos dados climáticos da zona de pés-mãe na produtividade de rebentos, sendo [0] a semana de preparação dos rebentos, [-1] a semana anterior, [-2] a segunda semana anterior, [-3] a terceira semana anterior, [0, -1] a média da semana de preparação dos rebentos e semana anterior, [0, -1, -2] a média da semana de preparação dos rebentos e das duas semanas anteriores e [0, -1,-2,-3] a média da semana de preparação dos rebentos e das três semanas anteriores.	91
Figura 3.7 - Sedimentação das componentes dos dados médios das 4 semanas ([0,-1,-2,-3]).	92
Figura 3.8 - Representação gráfica das componentes principais para as variáveis analisadas para o agrupamento das quatro semanas de produção. Na elipse 1 encontram-se representados as variáveis bem representadas na componente 1 com acção directa e no elipse 2 as variáveis bem representadas na componente 1 mas de acção indirecta.	92

Figura 3.9 - Representação gráfica da relação entre as 4 variáveis climáticas, temperatura média (MedT), <i>DPV</i> médio (MedDPV), média radiação (RadMed) e número de horas com humidade relativa entre 70 e 80% (HR70x80), e a produção (PRO) dos quatro materiais vegetais testados, AC58, BC422, GM258 e YG15.	94
Figura 3.10 - Efeito da radiação solar média diária e <i>DPV</i> na produção de rebentos de GM258.....	95
Figura 3.11 - Efeito da radiação solar média diária e <i>DPV</i> na produção de rebentos de AC58.....	96
Figura 3.12 - Efeito da radiação global média diária na produção de rebentos de AC58 e GM258.....	97
Figura 3.13 - Efeito da radiação solar média diária na produção de rebentos de BC422 e YG15.	98
Figura 3.14 - Efeito da radiação solar global na produção de rebentos de BC422 e YG15.....	98
Figura 3.15 - Sedimentação das componentes principais da relação entre os dados climáticos da estufa dos pés-mãe e o seu efeito no enraizamento dos rebentos.....	99
Figura 3.16 - Extracção da variância explicada em duas componentes, para a avaliação do efeito dos dados climáticos da zona de pés-mãe no enraizamento, sendo [0] a semana de preparação dos rebentos, [-1] a semana anterior, [-2] duas semanas anteriores, [-3] três semanas anteriores, [0,-1] a média da semana de preparação dos rebentos e semana anterior, [0, -1, -2] a média da semana de preparação dos rebentos as duas semanas anteriores e [0,-1,-2,-3] a média da semana de preparação dos rebentos e as três semanas anteriores.	100
Figura 3.17 - Sedimentação das componentes principais da relação dos dados climáticos da estufa dos pés-mãe médios das 4 semanas ([0,-1,-2,-3]) e o seu efeito no enraizamento.	101
Figura 3.18 - Representação gráfica das componentes principais das variáveis analisadas para os valores médios de 4 semanas dos dados climáticos de produção no enraizamento.	101
Figura 3.19 - Representação gráfica da relação entre as 4 variáveis climáticas, temperatura média (MedT), <i>DPV</i> médio (MedDPV), média radiação (RadMed) e humidade relativa média, e o enraizamento (ROT) dos quatro materiais vegetais testados, AC58, BC422, GM258 e YG15.	103
Figura 3.20 - Efeito da temperatura média na produção de rebentos de AC58 e GM258.	105

Figura 3.21 - Efeito do DPV na produção de rebentos de AC58 e GM258.....	105
Figura 3.22 - Sedimentação das componentes variáveis da relação dos dados climáticos da estufa de enraizamento e o seu efeito no enraizamento dos rebentos.	106
Figura 3.23 - Extracção da percentagem da variância explicada em duas componentes em função da semana para os dados de enraizamento, sendo a semana de preparação dos rebentos [0], a semana seguinte [+1], as segunda semana seguintes [+2], a terceira semana seguinte [+3], a média da semana de preparação dos rebentos e semana seguinte [0,+1], a média da semana de preparação dos rebentos as duas semanas seguintes [0,+1, +2] e a média da semana de preparação dos rebentos e as três semanas seguintes [0,+1,+2,+3].	107
Figura 3.24 - Sedimentação das componentes principais dos dados climáticos, da estufa de enraizamento, médios das quatro semanas [0,+1,+2,+3] e o seu efeito no enraizamento.	108
Figura 3.25 - Representação gráfica das componentes principais para as variáveis analisadas para o agrupamento das quatro semanas de enraizamento.	108
Figura 3.26 - Representação gráfica da relação entre as 4 variáveis climáticas, temperatura média (MedT), <i>DPV</i> médio (MedDPV), média radiação (RadMed) e humidade relativa média (MedHR), e o enraizamento (ROT) dos quatro materiais vegetais testados, AC58, BC422, GM258 e YG15.....	110
Figura 3.27 - Efeito da temperatura no enraizamento dos clones AC58 e GM228.	112
Figura 3.28 - Efeito da temperatura no enraizamento do BC422 e YG15.	113

1 - INTRODUÇÃO

A produção de culturas protegidas em estufa, para além da protecção física dos factores ambientais externos, permite a criação de condições ambientais favoráveis ao desenvolvimento das culturas instaladas no seu interior. A modificação das condições ambientais depende das condições climáticas específicas do local, do tipo de estrutura, dos materiais utilizados na cobertura e dos equipamentos instalados, como por exemplo, sistemas de aquecimento, de arrefecimento e de controlo da radiação solar. Estes equipamentos, por sua vez, devem estar devidamente dimensionados de acordo com as condições climáticas locais e das próprias condições ambientais favoráveis para as culturas.

O controlo ambiental em culturas protegidas assume uma grande importância e, a par da rega e da nutrição, é um dos factores limitantes do crescimento e desenvolvimento das plantas. A eficácia deste controlo pode ser avaliada pela utilização de modelos matemáticos para a previsão das condições climáticas interiores. Estes modelos, após a sua validação, permitem a simulação de diferentes condições climáticas exteriores e/ou diferentes estratégias de funcionamento dos equipamentos de condicionamento ambiental. De um modo geral, a previsão da temperatura interior é efectuada através da realização de balanços de energia e a humidade relativa através de balanços de massa.

O presente estudo foi realizado no compartimento destinado à propagação vegetativa nos Viveiros do Furadouro Lda., do grupo Altri. Este viveiro está localizado no Olho Marinho, Óbidos, na estrada nacional 114 (39° 20' 21'' N, 9° 13' 38'' W e altitude de 34 m). A estufa de propagação é do tipo “Venlo” com cobertura de vidro e uma área total de 2304 m², altura média de 5,7 m, orientação Norte-Sul e está equipada para a propagação clonal de *Eucalyptus globulus* Labill. pela técnica de miniestacaria. A área total foi seccionada em duas partes: uma parte a sul com uma área de 672 m² para a produção dos pés-mãe e os restantes 1632 m² para a área de propagação. Dentro da área de propagação existe um estufim de 360 m² que se destina a criar condições mais específicas para as primeiras fases de propagação. Em cada destas secções (estufas) existem múltiplos sistemas de condicionamento ambiental (aquecimento, arrefecimento evaporativo por painel húmido e nebulização, controlo da radiação solar e poupança energética, renovação de ar natural e

dinâmica). Cada um destes sistemas tem um controlo independente e computadorizado que permite múltiplas alternativas e estratégias de programação, para se atingir os objectivos pretendidos, a partir do conhecimento pormenorizado da dinâmica dos parâmetros ambientais, bem como da influência individual que cada equipamento tem sobre estes parâmetros.

Considerando que não existem disponíveis na literatura estudos detalhados sobre a influência das variáveis ambientais que influenciam o enraizamento e a produtividade de estacas caulinares para o género *Eucalyptus*, o que justifica as diferenças de eficiência registadas nos diferentes viveiros, um dos objectivos do presente trabalho incluiu uma avaliação alargada destas variáveis, de forma a determinar qual, ou quais os parâmetros, que assumem maior relevância. Os parâmetros em estudo foram a temperatura, a humidade relativa, a pressão de vapor do ar e a radiação solar, assim como a decomposição destas variáveis em parâmetros, como por exemplo, a temperatura média, máxima ou mínima, períodos de tempo em que ocorrem determinadas condições, etc.

Para concretizar estes objectivos, foi necessário efectuar uma revisão sobre os parâmetros que permitem compreender a complexidade do controlo ambiental em estufas e os factores que interferem neste controlo. Assim, construíram-se e validaram-se modelos de controlo ambiental para as condições de produção da estufa acima referida, que permitem prever as condições climáticas no interior da estufa, em função das condições meteorológicas exteriores e das características e equipamentos existentes.

O conhecimento das condicionantes ambientais para os processos de enraizamento e de produção de miniestacas de *Eucalyptus globulus* Labill. permitirão maximizar a sua eficiência e, os modelos climáticos, permitirão estabelecer os correctos objectivos de funcionamento para os distintos sistemas de controlo ambiental da estufa de produção.

2 - MODELAÇÃO DO CLIMA EM ESTUFA CLIMATIZADA

2.1 - Introdução

A eficácia do controlo ambiental em estufas pode ser avaliada pela utilização de modelos matemáticos para a previsão das condições climáticas interiores e, após a sua validação, permitem a simulação de diferentes condições climáticas exteriores e/ou diferentes estratégias de funcionamento dos equipamentos de condicionamento ambiental. De um modo geral, a previsão da temperatura interior é efectuada através da realização de balanços de energia e a humidade relativa através de balanços de massa.

Apresentam-se neste capítulo os parâmetros que permitem compreender a complexidade do controlo ambiental, os factores que interferem neste controlo e, ainda, a construção e a validação de modelos que permitem prever as condições climáticas no interior da estufa, considerando as condições meteorológicas exteriores e as características e equipamentos existentes no compartimento destinado à propagação vegetativa de estacas de *Eucalyptus globulus* Labill., nos Viveiros do Furadouro Lda., do grupo Altri.

2.1.1 - Variáveis climáticas

As condições climáticas locais são determinantes do microclima dentro de uma estufa e condicionam a sua gestão, pelo que é necessário conhecê-las para que se possa projectar e construir uma estufa (Castilla, 2005). Este autor refere que os elementos do clima mais importantes para as culturas protegidas são a radiação solar, a temperatura, a humidade, o vento e a precipitação, que ocorrem ao longo do ano.

2.1.1.1 - Radiação

A radiação é uma característica dos corpos, onde o comprimento de onda emitido depende da sua temperatura. Quanto maior a temperatura maior é a quantidade de energia emitida mas, de menor comprimento de onda (Castilla, 2005). A radiação solar chega à terra com comprimentos de onda entre os 300 e 2500 nm (99%) e a radiação visível – “luz” – está compreendida entre os comprimentos de onda de 380 a 760 nm. A radiação fotossintética activa (PAR), muito importante para as plantas, situa-se entre os 400 e 700 nm e, corresponde a cerca de metade da energia solar (Bot e Braak, 1995). A radiação solar é a fonte de energia para o crescimento e desenvolvimento das plantas e o principal factor para

a bio-productividade vegetal (Castilla, 2001), apesar de apenas uma pequena parte ser absorvida pela cultura e utilizada directamente na fotossíntese, sendo o remanescente convertido em calor (Bot e Braak, 1995)

Da radiação incidente, à que diferenciar entre a radiação infravermelha, responsável pelo aumento de temperatura, e a radiação visível que tem importância na fotossíntese e noutros processos fisiológicos vegetais. Estes factos levam à necessidade de estudar a intensidade da radiação solar (fig. 2.1) e a duração de horas de sol, que dependem de factores, tais como (Hernández, 2000):

- ✓ Factores meteorológicos do ambiente, como a nebulosidade, presença de poeiras na atmosfera e nas paredes das estufas e a condensação de gotas de água na cobertura;
- ✓ Material de cobertura, por um lado, relacionado com a transmissibilidade do material de cobertura e por outro, pelos aditivos existentes nestes materiais que reduzem a condensação ou convertem a radiação solar incidente em difusa;
- ✓ Características de construção, nomeadamente a orientação, forma e inclinação da estufa.

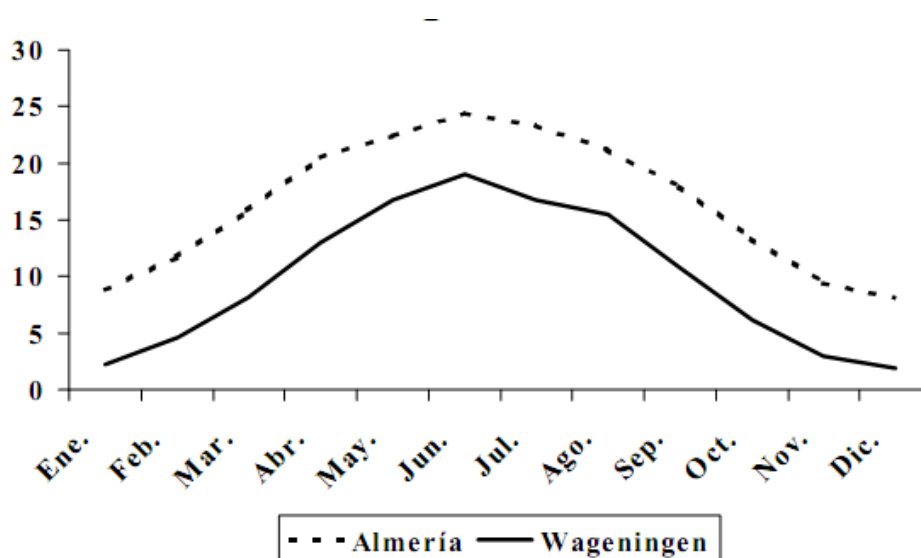


Figura 2.1 - Evolução da radiação solar ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) ao longo do ano em Almería (Espanha) e Wageningen (Holanda). Fonte: Castilla, 2001.

2.1.1.2 - Temperatura

Day e Bailley (1999) referem que, para além da radiação visível, água, CO_2 e nutrição mineral, a temperatura é um dos principais factores ambientais que afecta o crescimento

das plantas. As baixas e altas temperaturas provocam alteração do desenvolvimento das culturas pelos efeitos directos de congelamento e queima e, devido à sua influência na pressão de vapor saturado e no défice de pressão de vapor (*DPV*), tem também uma grande influência nas perdas de água por evapotranspiração.

A temperatura, segundo Hernandez (2000), é a principal variável climática a considerar quando é escolhido o local de instalação de uma estufa. O aumento da temperatura no interior da estufa é devida, por um lado, ao aquecimento das plantas, dos objectos e indirectamente do ar do recinto e, por outro lado, o facto da cobertura deixar passar quase a totalidade da radiação solar (infravermelho de longo comprimento de onda) e reter a radiação emitida pelo solo (infravermelho de curto comprimento de onda).

De uma forma geral, as necessidades de temperatura das culturas produzidas em estufa, podem ser resumido da seguinte forma (Zabeltitz, 1999):

- ✓ As plantas podem ser mortas pelo gelo, pelo que a temperatura mínima deve ser acima de 0°C, mas o risco da existência de temperaturas negativas pode ser descurado no caso da temperatura diurna ser superior a 7°C;
- ✓ Plantas cultivadas em estufa estão, normalmente, bem adaptadas a temperaturas entre os 17 e 27°C;
- ✓ Se a temperatura média diária for inferior a 12 °C as estufas terão de ser aquecidas;
- ✓ Se a temperatura média diária for superior a 22°C poderá ser necessário recorrer a um sistema de arrefecimento artificial;
- ✓ A temperatura máxima absoluta não deve ser superior à faixa dos 35 a 40°C;
- ✓ No Inverno (Novembro; Dezembro e Janeiro) deve-se ter um mínimo de 500 a 550 horas de sol, o que corresponde a uma insolação diária de 2300 W h m⁻² d⁻¹. O limite mínimo para a produção vegetal situa-se em 1000 W h m⁻² d⁻¹;
- ✓ Temperatura do solo não deve baixar dos 15°C.

A temperatura, medida por um termómetro que se encontra em equilíbrio térmico com o ar envolvente, pode também ser denominada por temperatura do bolbo seco (T_{bs} , °C). Para além da temperatura (do bolbo seco) existe a temperatura do bolbo húmido (T_{bh} , °C) e o ponto de orvalho, que são muito importantes para o controlo climático nas culturas protegidas.

A temperatura de bolbo húmido, segundo Albright (1990), é uma medida termodinâmica da concentração de vapor no ar e também, o limite de temperatura a que o ar fica saturado. A determinação desta temperatura pode ser efectuada pelo gráfico psicométrico ou por cálculos com processos interactivos. O ponto de orvalho é a temperatura onde, por arrefecimento do ar, é formada condensação e é, normalmente, inferior à temperatura do bolbo húmido.

2.1.1.3 - Humidade

Numa estufa, a água encontra-se principalmente em estado líquido no solo, substratos e células vegetais, ou sob a forma de vapor no ar e espaços intercelulares das folhas. Existem diversas formas de expressar a quantidade de vapor de água do ar, sendo importante compreender os limites de transpiração para se poder entender o seu efeito no ambiente e nas culturas. Outra consideração importante é o facto que a quantidade de vapor contida no ar é dependente da temperatura (Jarvis, 1998).

Seguidamente apresenta-se as principais formas de expressão de humidade:

Humidade absoluta – quantidade de água por unidade de volume de ar, g m^{-3}

Razão de mistura ou humidade específica – massa de vapor de água evaporada numa unidade de massa de ar seco, $\text{kg}_{\text{água}} \text{kg}_{\text{ar seco}}^{-1}$.

Humidade relativa – a unidade mais amplamente utilizada de quantificação da humidade do ar. A humidade relativa (HR, %) é a relação entre a quantidade de vapor do ar nesse momento (X_a) e a quantidade máxima de água do ar no ponto de saturação (X_s) à mesma temperatura e, expressa em percentagem. O cálculo da HR pode ser efectuado em função da humidade absoluta, humidade específica e por pressão de vapor (eq. 2.1).

$$HR = \left(\frac{X_a}{X_s} \right) 100 \quad (2.1)$$

A concentração de vapor saturado (e_s , kPa) e actual (e_a , kPa), são formas de expressão da quantidade de vapor de água muito utilizadas no cálculo da HR e, segundo Allen et al. (1994), são dadas pelas seguintes fórmulas:

$$e_s = 0,611 \exp \left(\frac{17,27 T_{bs}}{T_{bs} + 237,3} \right) \quad (2.2)$$

$$e_a = 0,611 \exp \left(\frac{17,27T_{bs}}{T_{bs} + 237,3} \right) \left(\frac{HR}{100} \right) \quad (2.3)$$

Onde T_{bs} representa a temperatura do bolso seco (°C)

Allen et al. (1994) indicam que, pela resolução da equação 2.4, se determina a pressão actual apenas em função das temperaturas de bolbo seco e bolbo húmido (T_{bh} -°C). Nesta equação Y representa o coeficiente de ventilação da sonda ($m \ s^{-1} \ ^\circ C^{-1}$) e P a pressão atmosférica (kPa).

$$e_a = 0,611 \exp \left(\frac{17,27T_{bh}}{T_{bh} + 237,3} \right) - Y(T_{bs} - T_{bh})P \quad (2.4)$$

A diferença entre a pressão saturada e a pressão actual, outro conceito de humidade, é denominado défice de pressão de vapor ($DPV = e_s - e_a$). Esta medida da humidade, segundo Landis et al. (1992), representa a demanda em evapotranspiração pelo ambiente envolvente, dado que, quanto menor for o valor do DPV , mais se aproxima da saturação onde a pressão actual e saturada são iguais ($e_s = e_a$).

Jarvis, W. (1998) propõe a seguinte equação para o cálculo do DPV :

$$DPV = 0,611 \exp \left(\frac{17,27T_{bs}}{T_{bs} + 237,3} \right) \left(1 - \frac{HR}{100} \right) \quad (2.5)$$

Este mesmo autor refere que para os valores ideais de HR, entre 55 e 95% (DPV entre 1 e 0,2 kPa), têm um efeito reduzido sobre a fisiologia e desenvolvimento das culturas hortícolas. No entanto, a valores superiores a 1 kPa, ocorrem fenómenos de stress hídrico – as plantas perdem mais água por transpiração do que conseguem absorver pelo sistema radiculares e valores baixos de DPV podem, por depósito de humidade nos tecidos e baixa evapotranspiração, aumentar a incidência de doenças criptogâmicas, desenvolvimento anormal e carências localizadas de cálcio.

2.1.2 - A modificação do ambiente em estufas

Segundo Bakker e Challa (1995), o desenvolvimento das culturas em estufa é o resultado do avanço tecnológico, da procura e consumo de luxo (produtos fora de época, exóticos, etc.). Estes autores referem ainda que a principal distinção entre as culturas protegidas, relativamente às culturas ao ar livre, é a existência de uma barreira entre a cultura e o

ambiente exterior. Esta barreira cria um microclima dentro da estufa que protege as culturas do vento, precipitação, infestantes, pragas, doenças e animais. Esta barreira também permite ao produtor condicionar o ambiente no interior da estufa. Esta protecção torna possível a utilização de sistemas de climatização como aquecimento, arrefecimento, aumento da concentração de dióxido de carbono e a aplicação efectiva de medidas de protecção das culturas sejam químicas ou biológicas.

2.1.2.1 - Estufas e materiais

Segundo Zabeltitz (1999), as culturas protegidas podem ser classificadas em função de:

- ✓ Características de construção – largura, túnel simples ou multi-túnel, altura de pé direito, forma e inclinação do tecto;
- ✓ Materiais de cobertura – vidro, plásticos rígidos, filmes plásticos ou a combinação entre materiais;
- ✓ Materiais da estrutura – aço, alumínio, madeira ou combinações entre materiais.

A localização geográfica do local a implantar as estufas condicionam em muito o tipo de matérias a utilizar. Como exemplo, pode-se referir que os países do centro e norte da Europa utilizam o vidro como material de cobertura e, as estufas construídas em climas mais amenos, como os países do sul da Europa, são cobertas com filmes plásticos.

As estufas nos países mediterrâneos, como Portugal, são normalmente estruturas de construção simples, cobertas com filmes de polietileno, sem sistema de aquecimento e o controlo do ambiente interior é conseguido essencialmente por utilização de várias técnicas de ventilação (Baptista, 2007).

Segundo Zabeltitz (1999) os principais problemas de produção de plantas em estufas nos países mediterrâneos são:

- ✓ Temperaturas abaixo do óptimo biológico durante as noites do Inverno, existindo a necessidade de aquecimento durante estes meses (de um a três);
- ✓ Temperaturas muito altas durante o dia, mesmo nos meses de Primavera;
- ✓ Humidade muito alta durante a noite;
- ✓ Vento;
- ✓ Baixa qualidade de água e pouca capacidade de armazenamento;

- ✓ Deficiência de dióxido de carbono em estufas fechadas durante o dia.

Postas todas estas considerações, seguidamente serão apresentados, sucintamente, os principais sistemas existentes nas estufas que permitem controlar o meio ambiente interior.

2.1.2.2 - Sistemas de arrefecimento

Como já foi referido em epígrafe, nos países mediterrâneos é necessário controlar o excesso de temperatura durante o dia. Esse controlo é conseguido principalmente pela utilização de sistemas de ventilação e de arrefecimento evaporativo. Além da temperatura estes sistemas permitem ter algum controlo sobre a humidade.

Ventilação

A ventilação é um dos processos chave na alteração no microclima das estufas, sendo muitas vezes o único meio de controlar a temperatura e humidade.

Gonzalvez-Real e Baille (2000) referem que a ventilação é baseada na avaliação da taxa de renovação de ar e no fluxo de ar que passa pelas janelas. Estes sistemas devem cumprir três critérios:

- ✓ Proporcionar uma taxa de renovação de ar elevada;
- ✓ Induzir a mistura do ar interior e exterior;
- ✓ Gerar uma velocidade adequada do ar com o fim de promover o intercâmbio de energia e massa entre as culturas e o ar interior.

A ventilação das estufas pode ser natural, quando as trocas são realizadas naturalmente pelas aberturas existentes, principalmente pelas janelas, ou forçada quando se utilizam ventiladores mecânicos que promovam estas trocas.

Ventilação natural

A ventilação natural ocorre pela passagem de fluxos de ar pelas janelas (laterais, zenitais ou ambas) e a sua movimentação é promovida pela impulsão térmica (ocasionada pela alteração da temperatura do ar e a diferença entre a temperatura interior e exterior) e, pelo efeito do vento. Normalmente a impulsão térmica e o efeito do vento existem simultaneamente, pelo que se estuda o efeito combinado destas duas forças. O verdadeiro

mecanismo da movimentação do ar é a diferença de pressão causada pela impulsão térmica e pelo efeito do vento.

Baptista (2007) refere que o efeito da impulsão térmica pode ser negligenciado quando o vento é forte e, quando não existe vento, o gradiente de temperaturas é o principal responsável pelas renovações de ar.

Boulard e Baille (1995) estudaram vários modelos utilizados para a previsão de taxas de ventilação, tendo concluído que o efeito combinado da impulsão térmica e do vento tem um melhor ajustamento do que estudados de forma isolada. Em estufas equipadas apenas com janelas laterais ou zenitais, estes autores mostraram que o caudal de ventilação (CV , $m^3 s^{-1}$) pode ser simulado pela resolução da seguinte equação:

$$CV = \frac{A_j}{2} C_d \left(2g \frac{\Delta T}{T_e} \frac{h_j}{4} + C_v V_v^2 \right)^{0.5} \quad (2.6)$$

Para resolução desta equação é necessário conhecer a área de janelas (A_j , m^2) a cada instante, o coeficiente de descarga (C_d - adimensional), a aceleração da gravidade (g , $9,8 m s^{-2}$), a diferença entre a temperatura interior e exterior (ΔT , $^{\circ}C$), a temperatura absoluta exterior (T_e , $^{\circ}K$), a altura vertical da janela (h_j , m), o coeficiente global de pressão do vento (C_v , adimensional) e, finalmente, a velocidade do vento (V_v , $m s^{-1}$).

Nesta equação (2.6), a primeira expressão da parte que está entre parênteses, representa o efeito da impulsão térmica e a segunda, o efeito do vento.

Para o caso de estufas onde existem simultaneamente janelas laterais e zenitais, Bolard et al. (1997) propõe a expressão:

$$CV = \frac{A}{2} C_d \left(2g \varepsilon^2 \frac{\Delta t}{T_e} \frac{h_j}{4} + C_v V_v^2 \right)^{0.5} \quad (2.7)$$

Onde ε representa a importância relativa das áreas das aberturas zenitais (J_z , m^2) e laterais (J_l , m^2) na área de ventilação geral (J_t , m^2).

$$\varepsilon = \frac{2\sqrt{2b}}{(1+b)(1+b^2)^{0.5}} \quad (2.8)$$

e

$$b = \frac{J_z}{J_l} \quad (2.9)$$

O coeficiente de descarga pode ser calculado pela expressão: $C_d = \xi^{-0,5}$, onde ξ representa o coeficiente de resistência da abertura, que corresponde às perdas devido à contracção do ar nas aberturas devido à fricção do ar nas paredes ou telhado.

No quadro 2.1 encontram-se os coeficientes de descarga, determinados para diferentes aberturas de ventilação e por diferentes autores. Os coeficientes do efeito do vento também têm sido estudados por diversos e encontram-se no quadro 2.2.

Quadro 2.1 - Coeficientes de efeito do vento determinados por diversos autores para estufas. Adaptado de Baptista e Cruz (2007).

<i>Autores</i>	<i>C_d</i>	<i>Tipo abertura</i>
De Jong (1990)	0,65 - 0,75	Telhado
Boulard e Baille (1995)	0,644	Contínua
Bot (1983)	0,65 - 0,7	Telhado
Abreu e Menezes (2005)	0,45 - 0,71	Lateral

Quadro 2.2 - Coeficientes de descarga determinados por diversos autores. Adaptado de Baptista e Cruz (2007).

<i>C_v</i>	<i>Área</i>	<i>Fonte</i>
0,10	416	Boulard e Baille (1995)
0,14	179	Kittas et al. (1995)
0,071	900	Kittas et al. (1995)
0,13	416	Papadakis et al. (1995)
0,09	204	Baptista et al. (1999)
0,11	38700	Bailey (2000)
0,099 - 0,271	182	Abreu e Menezes (2005)

Uma forma expedita de avaliar se a área de ventilação está bem dimensionada, é a relação entre a área de abertura e a área ocupada pela estufa. Segundo Zabeltitz (1999), a área de janelas deve estar compreendida entre 15 a 25%.

Ventilação forçada

A ventilação forçada, mecânica ou dinâmica, é conseguida pela utilização de ventiladores ou extractores que forçam a movimentação do ar.

Segundo Zabeltitz (1999) a ventilação forçada é a forma mais efectiva de ventilar uma estufa, mas requer consumo de energia eléctrica. O princípio da ventilação forçada é a criação de uma corrente de ar pela estufa, onde as ventoinhas extraem o ar interior para o exterior, sendo provocada entrada de ar preferivelmente, pelo lado oposto. Para a utilização de ventilação forçada devem ser considerados os seguintes elementos:

- ✓ As ventoinhas devem extrair o ar da estufa; pois desta forma melhoram a distribuição da temperatura no seu interior;
- ✓ A distância entre duas ventoinhas não deve exceder os 8 – 10 metros;
- ✓ Devem ter capacidade de criar uma pressão estática de 30 Pa;
- ✓ Se possível, devem estar localizadas do lado barlavento (lado abrigado do vento);
- ✓ Deve ser deixado um espaço de 1,5 vezes o diâmetro da ventoinha do local de exaustão até à próxima obstrução;
- ✓ A área de abertura, do lado oposto, deve de ter no mínimo 1,25 vezes a área da ventoinha;
- ✓ A velocidade do ar não deve ser muito alta, e nos locais onde existem plantas não deve ser superior a $0,5 \text{ m s}^{-1}$;
- ✓ As aberturas da ventilação devem fechar automaticamente quando os ventiladores estão inoperacionais.

Wacquant (2000) citado por Castilla (2005) refere que o caudal dos ventiladores deve ser calculado para ter 20 a 30 renovações de ar por hora e, no verão, de 40 a 80 renovações. Zabeltitz (1999) refere que são necessários mais de 55 renovações de ar por hora ou um caudal superior a $170 \text{ m}^3 \text{ m}^2 \text{ h}^{-1}$ para manter a temperatura no máximo 5°C acima da temperatura exterior. Este autor, propõe também que o número de renovações de ar (R , h^{-1}) pode ser calculado em função do volume de ar extraído (CV , $\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$) em relação ao volume da estufa (V_e , m^3) pela expressão 2.10 e o volume de ar trocado (V_a , $\text{m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) relativamente à área da estufa (A_e , m^2) em função da equação 2.11.

$$R = \frac{CV}{V_e} \quad (2.10)$$

$$V_a = \frac{CV}{A_e} \quad (2.11)$$

Arrefecimento evaporativo

Os sistemas de arrefecimento evaporativo, são necessários quando a temperatura média diária é superior a 22°C (Zabeltitz, 1999) e, tal como o nome indica, baseiam-se na evaporação de água. A água, para passar do estado líquido para vapor consome energia. A energia necessária, para esta mudança de estado físico é denominada de calor latente de vaporização (λ - MJ.kg⁻¹) e ronda os 2,5 MJ kg⁻¹ de água (Bot, 1995; González-Real e Baille 2000; Castilha, 2005;).

A quantidade de energia necessária para a evaporação da água depende da temperatura do ar (T , °C). Allen et al. (1994) propõe a seguinte equação para o cálculo da energia consumida:

$$\lambda = 2,501 - (2,361 \times 10^{-3})T \quad (2.12)$$

Painel evaporativo

É no arrefecimento evaporativo que se pode, para além do cálculo da humidade do ar, entender o papel e o potencial da utilização da temperatura do bolbo húmido. Hanan et al. (1978), referem que a temperatura do bolbo húmido é a temperatura mínima que se consegue arrefecer uma estufa com a utilização de painéis evaporativos. No entanto, quando existe arrefecimento, deve ser conhecido o ponto de orvalho, para que os produtores saibam até que temperatura pode arrefecer o ar, sem que se forme condensação na folhagem e/ou cobertura, prevenindo assim o aparecimento de certas doenças criptogâmicas.

Segundo Nelson (1991), o sistema de painel evaporativo está disponível desde 1954 e continua a ser o sistema mais utilizado para o arrefecimento das estufas no verão. O sistema baseia-se na colocação num dos lados da estufa, de um painel vertical onde está permanentemente a correr água, e do outro, ventoinhas de extracção. O painel,

tradicionalmente, era composto por lascas de madeira, mas actualmente é utilizado um painel celuloso semelhante a um cartão canelado. O ar entra na estufa pelo interior do painel, evaporando água (fig. 2.2). Esta evaporação de água provoca o arrefecimento do ar para perto da temperatura do bolbo húmido. O ar entra na estufa pela depressão provocada pela exaustão do ar interior, pelos ventiladores. Todo o ar deve entrar pelo painel e sair pelos ventiladores para que não se baixe a capacidade de arrefecimento, nem se perturbem os fluxos de ar. Para que isto ocorra, todas as aberturas, como portas e janelas, devem estar fechadas.

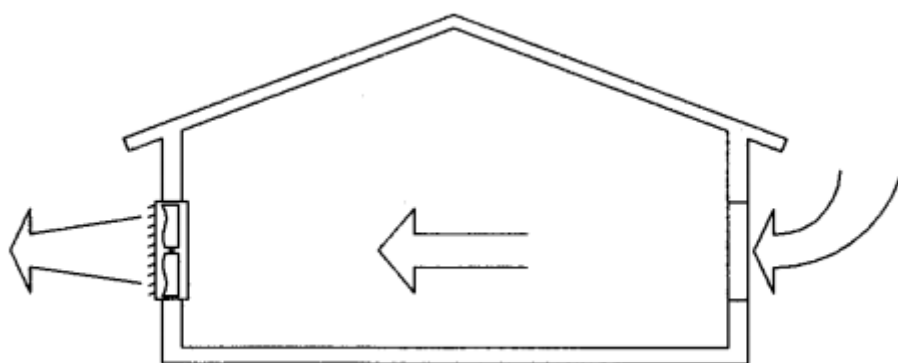


Figura 2.2 - Sistema de arrefecimento com painel evaporativo (dir.) e ventilação dinâmica (esq.). Fonte: Munters (2000).

Para um correcto funcionamento e para se conseguir o máximo de arrefecimento, devem ser cumpridas as seguintes indicações (González-Real e Baille, 2000):

- ✓ Os painéis são formados por lascas de madeira colocadas numa tela metálica ou construídos em materiais celulósicos;
- ✓ A espessura do painel varia entre 0,1 e 0,2 m;
- ✓ A superfície total de painel deve ter, aproximadamente, de 1m^2 por cada 20 a 30m^2 de área coberta;
- ✓ A distância máxima entre o painel e o ventilador não deve exceder os 30 a 40 m;
- ✓ A distância máxima entre ventiladores não deve exceder os 10 m;
- ✓ A velocidade do ar deve de estar compreendida entre $0,5$ e $1,75\text{ m s}^{-1}$;
- ✓ A taxa de renovação de ar deve estar compreendida entre 120 e $150\text{ m}^3\text{ h}^{-1}\text{ m}^{-2}$ de estufa;

- ✓ Para se obter um bom rendimento do sistema, exige que se construa uma estufa fechada e com um bom nível de hermeticidade;
- ✓ Pode ser utilizado com água de baixa qualidade.

Nelson (1991) descreve pormenorizadamente todos os factores a considerar para o correcto dimensionamento de um sistema de arrefecimento com painel evaporativo.

Kittas et al. (2003), estudando o arrefecimento evaporativo com painel húmido e ventilação, utilizou modelos climáticos para determinar a temperatura a meio e no final da estufa, perto das ventoinhas de exaustão. Nesse trabalho, foi utilizada uma estufa com 60 m comprimento e, devido a esta elevada distância, foi observado um elevado gradiente de temperaturas ao longo da estufa (maior que 8°C).

Fuchs et al. (2006), desenvolveram um procedimento que permite avaliar o arrefecimento por evaporação de água pela transpiração das culturas ou pela evaporação de água directamente do painel evaporativo.

Nebulização

A nebulização, introduzida nas estufas em 1980 (Nelson, 1991), tem os mesmos princípios de funcionamento que o painel evaporativo. Este processo é baseado na fragmentação de gotículas de água em gotas de 5 a 10 µm de diâmetro. Uma gota de 10 µm demora 16,9 minutos a cair de uma altura de 3 metros (Dobblings, 1995, citado por Morgan, 2001). A pequena dimensão das gotas e o tempo que demoram a cair, sobre as folhas da cultura ou solo, provoca a sua evaporação. Nelson (1991) refere que gotas de 10 µm, evaporam 40000 vezes mais rápido do que água numa taça e, com esta rápida evaporação, consegue-se quase 100% de eficiência de evaporação da água emitida. Este facto permite atingir facilmente a temperatura do bolbo húmido. Segundo González-Real e Baille (2000) a nebulização exige que as janelas estejam abertas e que se disponha de um sistema de ventilação eficiente.

A nebulização, nas estufas, pode ser utilizada com o objectivo principal de humificação ou arrefecimento, embora em qualquer das situações ocorram sempre estes dois fenómenos.

Existem basicamente três métodos de evaporação de água para a humificação/arrefecimento (Zabeltitz, 1999):

- ✓ **Humidificadores** – a água é aplicada a discos ou escovas que rodam a alta velocidade. Como principal vantagem tem o facto de poder ser utilizada com águas de baixa qualidade e a desvantagem do elevado desgaste das escovas ou discos. Uma destas unidades é suficientes para uma área de 30 a 50 m².
- ✓ **Bicos alta-pressão** – a água, a pressões de 30 a 60 bar, é empurrada por bicos com orifícios muito finos, pulverizando a água. É necessária água de elevada qualidade. Castilla (2005), indica que estes bicos têm um caudal de cerca de 7 l h⁻¹ e uma densidade de 0,06 a 0,1 bicos m⁻².
- ✓ **Bicos a ar-água** – a mistura de ar e água a baixa pressão, 2 bar para água e 3 bares para água, num bico apropriado, é suficiente para atomizar a água. Uma unidade é suficiente para 20 a 30 m². Castilla (2005) indica que estes bicos têm um caudal de cerca de 7 l h⁻¹ de água e 120 l min⁻¹ de ar e uma densidade de 0,06 a 0,1 bicos m².

Utilização de rede/ecrãs

A utilização de redes em estufas estava, tradicionalmente, restrito para situações de obscurecimento (“black-out”) e sombreamento. Nos finais dos anos 1970, a poupança energética tornou-se uma motivação importante para a utilização das redes (Breuer e Knies, 1995). Segundo Bakker e Holsteijn (1995) a utilização de redes tem, basicamente, quatro objectivos:

- ✓ **Obscurecimento** – O principal objectivo deste tipo de redes é a prevenção da entrada de luz para a estufa para encurtar o período do dia. A transmissibilidade de luz deve ser menor que 0,1%.
- ✓ **Sombreamento** – Estas redes são utilizadas na redução da incidência directa de radiação solar para proteger as culturas de stress hídrico, excesso de calor e redução da qualidade. Normalmente são utilizados tecidos ou redes com faixas de alumínio ou brancas e estruturas “relativamente abertas”, para minimizar o efeito nas movimentações do ar. A redução de luz depende das técnicas e materiais utilizados, mas geralmente varia entre 20 e 80%.

- ✓ **Poupança energética** - O principal objectivo é a redução das perdas de energia. Caso estes materiais sejam utilizados exclusivamente durante a noite, a transmissibilidade de luz não é importante, mas como na prática estes ecrãs também são utilizados durante o dia, tem de se combinar as características de isolamento térmico com a transmissibilidade de luz.
- ✓ **Controlo ambiental** – A melhoria das condições climáticas das estufas são cada vez mais populares. Os ecrãs são, maioritariamente, compostos por tecidos ou redes “abertas”, construídas com materiais à base de polietileno ou poliéster, com várias especificações para tentar corresponder às necessidades. Exemplo disso é a utilização de faixas de alumínio para fazer várias percentagens de sombreamento, ecrãs com faixas coloridas para a modificação do espectro de luz e ecrãs com faixas opacas para transformar a radiação directa em difusa.

Para além desta classificação, as redes também são classificadas em dois grandes grupos: sistemas permanentes (fixos) ou semi-permanentes (parcialmente móveis) e sistemas móveis. Os sistemas fixos, com a utilização de ecrãs ou tintas de sombra, têm como principal desvantagem a interferência continua na intercepção da luz e o aumento da humidade ambiente. Dadas as desvantagens dos sistemas fixos ou semi-fixos, os sistemas móveis são os mais utilizados.

2.1.2.3 - Sistemas de aquecimento

As necessidades de aquecimento, nos climas mediterrâneos, estão relacionadas com a manutenção da temperatura acima do mínimo biológico, durante as noites de inverno (Zabeltitz, 1999). O metabolismo das plantas é profundamente afectado pela temperatura ambiente, sendo complexo conhecer a influência da temperatura sobre o crescimento e desenvolvimento das culturas, dado que interferem em diferentes processos (divisão celular, expansão, assimilação de carbono, respiração, distribuição de assimilados, etc.) e cada um deles tem um determinado intervalo de temperatura, característico da espécie considerada, da fase de desenvolvimento e das condições prévias de crescimento. (López, 2000). Este autor considera que as culturas termófilas apresentam as seguintes alterações fisiológicas, quando estão abaixo do mínimo fisiológico:

- ✓ Redução do crescimento – especialmente o alongamento celular, expansão foliar e, consequentemente, diminuição da absorção da radiação solar;
- ✓ Diminuição da taxa de assimilação líquida;
- ✓ Depressão da respiração;
- ✓ Redução do transporte e distribuição de assimilados;
- ✓ Diminuição da absorção de água e sais minerais por aumento da viscosidade da água, aumento da resistência dos tecidos das plantas por diminuição da permeabilidade da membrana celular, redução da absorção e acumulação activa de iões e diminuição do crescimento radicular;
- ✓ Alterações anatómicas e morfológicas, nomeadamente tendência para o desenvolvimento de folhas mais largas e curtas, redução do comprimento do pecíolo, aumento da espessura da folha e diminuição da área foliar específica;
- ✓ Perda de fertilidade;
- ✓ Envelhecimento precoce dos tecidos fotossintéticos por necrose celular.

O fornecimento de calor, por sistemas de aquecimento, permite a manutenção da actividade metabólica das culturas e, caso se consiga ter um controlo dinâmico, consegue-se maximizar a diferença entre a taxa de produção e o consumo energético em função do resultado económico (Lourenzo, 2000).

Dos sistemas de aquecimento mais utilizados, encontram-se o aquecimento a água quente e o aquecimento a ar quente. Os sistemas de aquecimento a água quente têm, como principal vantagem, uma melhor distribuição do calor e o facto de não retirar humidade do ar. Os sistemas de ar quente, têm a capacidade de provocar um aumento rápido na temperatura, mas apresentam uma distribuição menos homogénea do calor (Hernández 2000).

Afonso (2005) comparou também estes sistemas de aquecimento a ar e água quente tendo concluído que:

- ✓ Existem diferentes saltos térmicos quando se inicia o aquecimento, ocorrendo nos sistemas a ar (termoventiladores) uma variação brusca da temperatura, enquanto no sistema a água (solo radiante) este aumento é mais gradual;
- ✓ O sistema a água quente consumiu, no mínimo, 30% mais energia que o sistema a ar quente;

- ✓ A corrente de ar produzida pelo sistema de aquecimento a ar permitiu valores de pressão de vapor superiores aos obtidos por sistema de água;
- ✓ O sistema de aquecimento por ar quente permitiu reduzir acentuadamente a ocorrência de condensação na cobertura.

O aquecimento de órgãos aéreos é efectuado por transmissão de calor por convecção e radiação, ou ambos, e o aquecimento do solo ou substrato é efectuado por condução (Castilla, 2005).

Aquecimento por convecção

Nos sistemas de aquecimento por convecção o elemento condutor é o ar. Devido à pouca inércia térmica do ar, estes sistemas proporcionam um aumento rápido da temperatura, e quando os sistemas deixam de actuar, o arrefecimento também é muito rápido. Este comportamento encontra-se ilustrado na figura 2.3, com sistemas de aquecimento a ar e água quente (López, 2001), que provoca grandes gradientes térmicos e perdas de calor. Estes sistemas de aquecimento têm um investimento inicial menor, comparativamente com os sistemas a água quente, mas o período de vida também é mais curto (López, 2000).

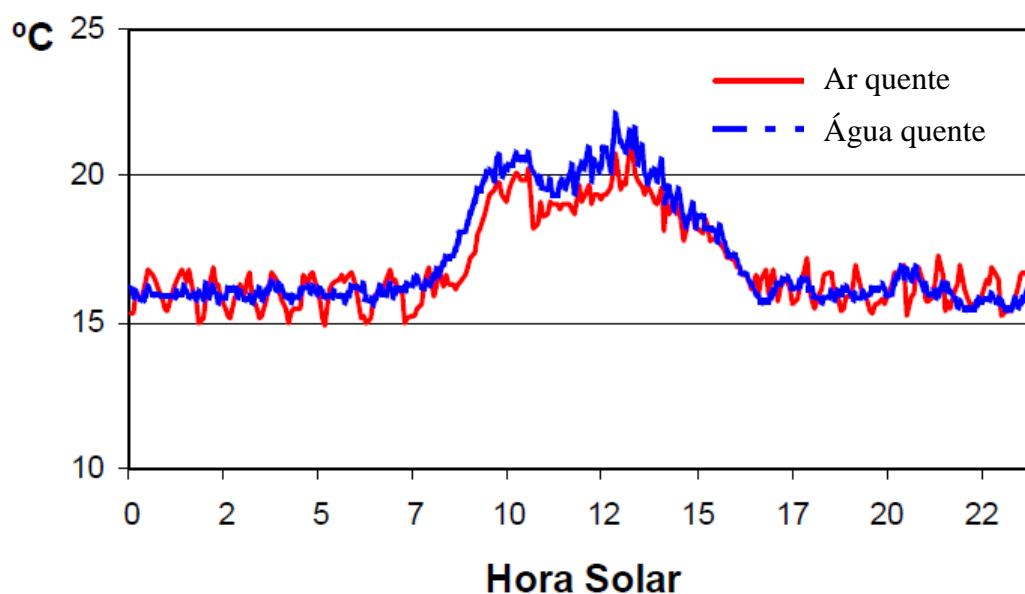


Figura 2.3 - Evolução da temperatura do ar (2 m) para sistemas de aquecimento a ar e água quente. Fonte: López (2001).

Existem três sistemas de produção ar quente (Castilla, 2005): termoventiladores, geradores de ar quente e bombas de calor. López (2001) refere que os sistemas convectivos mais utilizados, em Almeria, são os geradores de ar quente.

Os termoventiladores transmitem o calor de um corpo quente ao ar, sendo os termoventiladores a água os mais utilizados. Basicamente são radiadores, onde tubos metálicos são percorridos por água quente (aumento da superfície específica), para promover o intercâmbio de calor por convecção com o ar. A existência de alhetas nos tubos também aumenta a superfície de contacto e o ventilador melhora o intercâmbio e dissipa o ar quente pela estufa (Castilla, 2005).

Os geradores de ar quente queimam um combustível e aquecem o ar que, assim, é forçado a circular na estufa. Podem ter combustão directa ou indirecta (Castilla, 2005). Nos geradores de ar quente de combustão directa, tanto o ar quente quanto os gases de combustão são emitidos para o interior da estufa, razão pela qual se considera que tem rendimentos de 100% (López, 2001). Por este facto os gases de combustão devem conter o menor teor de elementos tóxicos possíveis, sendo o gás propano e o gás natural os mais utilizados (López, 2001). Dada a possibilidade da produção de gases tóxicos, como etileno (Hanan, 1978) e enxofre (Urban, 1997, citado por Castilla, 2005), estes equipamentos só devem de ser utilizados em aquecimento de protecção contra baixas temperaturas (excepcionais) ou de apoio (Castilla, 2005). Os geradores de ar quente de combustão indirecta, têm um permutador de calor que permite a separação dos gases de combustão, que são emitidos para o exterior. Como existe uma parte do calor que é expulso com os gases de combustão, estes equipamentos têm rendimentos de 80 a 90% (López, 2001).

As bombas de calor retiram o calor de uma fonte fria, água ou ar exterior, que depois é injectado na estufa. Estes equipamentos são pouco utilizados para o aquecimento de estufas (Castilla, 2005). Este autor refere que os sistemas convectivos são pouco eficientes, sendo utilizados maioritariamente em estufas de baixo custo, e utilizados para a protecção contra temperaturas baixas. Neste caso, as temperaturas objectivo de arranque do equipamento estão situadas entre os 5 e 7°C.

González-Real e Baille (2000) referem que com estes sistemas de aquecimento, as folhas das plantas têm uma temperatura inferior à temperatura ambiente, podendo provocar condensação nas plantas e originar problemas fitossanitários.

Aquecimento por radiação - convecção

Nestes sistemas de aquecimento, a transferência de calor é efectuada através de tubagens aéreas ou colocadas sobre o meio de cultura. Nestas tubagens, circula água quente, a baixa temperatura, 30 a 50°C ou a alta temperatura, normalmente até 90°C. Nos sistemas de alta temperatura a água deve entrar de 80 a 90°C e retornar a 60°C (Afonso, 2005). A temperatura da água também varia consoante o tipo de material utilizado, pois as tubagens de metal podem ser utilizadas a alta ou baixa temperatura, mas quando se utilizam materiais plásticos só se pode utilizar água a baixa temperatura (López, 2001).

A modificação da temperatura do ar ocorre por convecção pelo contacto com as tubagens aquecidas e o aumento da temperatura dos objectos (solo, plantas, cobertura, etc.) que estão em redor da tubagem dá-se por radiação. González-Real e Baille (2000) referem que a energia dissipada por radiação ou convecção têm a mesma magnitude. Estes autores referem também que a temperatura das folhas é semelhante ou superior à temperatura ambiente. Rodriguez (2009), num estudo comparativo de aquecimento com tubagem a água quente e sistema misto (tubagem de água quente e termoventilador), com um diferencial de temperatura de 10°C, obteve, respectivamente, temperaturas das plantas de 0,77 e 1,57°C inferiores à temperatura ambiente.

Aquecimento do solo por condução

López (2000 e 2001) refere que estes sistemas estão dimensionados para proporcionar uma temperatura adequada na zona radicular. O calor é transferido por condução para o solo por intermédio de tubagens enterradas, onde circula água com temperaturas inferiores a 40°C. O elevado investimento inicial e a dificuldade da mobilização do solo têm limitado o desenvolvimento destes sistemas de aquecimento

2.1.2.4 - Sistemas de controlo do clima em estufas

Quanto maior a complexidade de sistemas de condicionamento ambiental existentes numa estufa, maior é a necessidade de auxílio por sistemas informáticos. Quando existem apenas janelas e, as culturas pouco sensíveis às condições ambientais, o controlo manual, com ou sem apoio mecânico, é exequível. No caso da existência de múltiplos sistemas de condicionamento ambiental, como arrefecimento, aquecimento e controlo da radiação

solar, é necessário o auxílio de autómatos para que não ocorram incompatibilidades de operação. Exemplo de incompatibilidades de operação é o accionamento do painel evaporativo e renovação de ar dinâmica, com a permanência de janelas abertas.

Benavente et al. (2000) resumem, de forma simplificada, o automatismo de uma estufa em cinco níveis básicos:

1. Sem controlo automático – As operações são realizadas manualmente, sendo comuns em estufas onde o único sistema de controlo ambiental é efectuado com a abertura e fecho de janelas.
2. Controlo por horário – As operações são realizadas de forma automática à hora definida pelo utilizador. A informação é transmitida, geralmente, por sinal eléctrico, dos relés de saída do automatismo a electroválvulas, relés exteriores ou contactores, que arrancam e param os equipamentos correspondentes. Este nível de automatização é habitual no controlo de rega, e pode ser utilizado em controlos como nebulização e redes de sombra/térmicas. O automatismo pode ser muito simples, com utilização de interruptores horários, ou mais complexos com o recurso a autómatos e controladores.
3. Controlo por termóstato e automatismos similares – As operações são realizadas em função de uma variável climática e um valor objectivo, com ou sem desfasamento ou diferencial para a actuação do equipamento. Estes tipos de automatismo são utilizados, por exemplo, em sistemas de aquecimento com água quente. Uma vantagem dos termóstatos, relativamente ao controlo horário, é que os equipamentos apenas actuam em função das necessidades.
4. Controlo por autómatos programáveis ou controladores analógicos. O autómato possui inteligência centralizada que recebe informações vindas da estufa (através de entradas) e opera os actuadores ou sistemas (pelas saídas). Estas entradas e saídas podem ser digitais (circuito aberto/fechado) ou analógicas (recebem informação continua ou quase continua de 0 a 100% da sua escala). Nestes casos podem efectuar-se programações complexas de actuação, que podem depender de vários parâmetros climáticos e horários.
5. Controlo distribuído – Existe, normalmente um computador central ligado em série, com vários autómatos colocados no seu sector. O computador visualiza e armazena

a informação e envia ordens para os autómatos executarem as ordens pré-estabelecidas.

Castilla (2005) classifica os controladores em dois níveis: os não progressivos e progressivos. Controladores não progressivos apenas têm duas opções (ON/OFF) e são utilizados em sistemas de ventilação dinâmica, injeção de CO₂, sistemas de sombra e aquecimentos a ar quente. Uma desvantagem destes sistemas é o elevado número de arranques e paragens em torno do valor objectivo. Controladores progressivos, são aqueles que modulam o funcionamento em função do parâmetro a regular, dentro de um intervalo preestabelecido. Estes controladores podem ainda ser divididos em proporcional, proporcional integral e proporcional integral e derivado.

2.1.3 - Modelação do clima – Balanços de energia e massa

Um modelo é uma representação simplificada de um sistema. Esta representação é, normalmente, constituída por uma série de equações matemáticas (Castilla, 2005). A figura 2.4 é o exemplo de um modelo (à esquerda a realidade e à direita a tentativa da sua representação – o modelo).



Figura 2.4 - Representação da realidade (esquerda) e o respectivo modelo (direita) - Festival Internacional de Jardins 2010, Ponte de Lima.

Os modelos constituem uma ferramenta muito útil para a investigação do meio físico das estufas (Castilla, 2005) e são utilizados em aplicações de desenho de estruturas, de controlo do meio ambiente (clima, rega e fertilização) e gestão da cultura (Baille e González-Real, 2001). Castilla (2005) classifica os modelos da seguinte forma:

- ✓ Modelos estáticos – conjunto de equações baseadas nas leis da física, utilizadas para determinar diversos parâmetros, como por exemplo, as perdas de calor, ventilação, etc., num determinado instante;
- ✓ Modelos dinâmicos – estes modelos incorporam a variável tempo nas equações, e são utilizados para representar processos de resposta lenta, como por exemplo o aquecimento do solo. Podem ainda ser chamados de heurístico, caso sejam resolvidos por exploração ou prova e erro, ou estatísticos quando são utilizadas ferramentas estatísticas;
- ✓ Modelos físicos – modelos centrados no microclima das estufas, relativamente às condições climáticas exteriores;
- ✓ Modelos fisiológicos – quando estão relacionados com a planta e com os efeitos do microclima.

Para além dos aspectos apresentados em epígrafe, os modelos de simulação devem permitir, ao agricultor, maximizar benefícios (Castilla, 2005). Assim, estes modelos devem, por exemplo, prever a temperatura do ar interior da estufa, a temperatura do sistema de aquecimento ou a taxa de ventilação necessária, para que se cumpra um determinado objectivo, em função das condições do clima exterior (radiação solar, etc.) (Baille e González-Real, 2001).

Actualmente existem vários modelos, que, para além da simulação climática, permitem simular a interacção das variáveis climáticas e dos processos fisiológicos, como os trabalhos de Julliet (1994), González-Real et al. (1994, 1994b, 1996). Baptista (2007) utilizou os modelos climáticos para a previsão das condições ambientais que afectam as infecções de *Botrytis cinerea*, na cultura de tomate. Existem também já ferramentas informáticas, como o Hortisol (2006), que permitem a simulação do desenvolvimento de uma cultura com o objectivo de auxiliar os produtores na construção de estufas, gestão do microclima e condução da cultura. Os modelos utilizados para o controlo do ambiente no

interior das estufas são, maioritariamente, baseados em balanços de energia e massa para a previsão da temperatura e humidade, respectivamente.

Seguidamente serão referidos os aspectos e particularidades dos balanços de energia e balanços de massa.

2.1.3.1 - Balanços de energia

Os balanços de energia são calculados pela soma das perdas e ganhos de energia que ocorrem num certo período de tempo e permitem determinar a temperatura interior de uma estufa. Este método assume que, naquele período de tempo, as condições ambientais são constantes e usam o princípio de conservação de energia, onde os ganhos de calor são iguais às perdas e, mais um termo que se refere à capacidade de armazenamento de calor pela estufa (Baptista, 2007). O factor tempo permite que o balanço se torne dinâmico. Nestas condições os fluxos de energia podem ser diferentes de zero em cada período, levando a que a energia seja acumulada ou libertada como uma massa térmica, afectando a temperatura interior no período seguinte ao considerado ou conhecido (Perales et al, 2004; Perdignes et al. 2005; 2008a; 2008b).

A energia radiante, em qualquer espectro de radiação global, pode ser convertido em aquecimento. Numa estufa, a energia radiante é parcialmente utilizada na fotossíntese e evaporação de água e outra parte é convertida em aquecimento. Os fluxos de aquecimento resultam das transferências de calor por condução, convecção, radiação e evaporação. Quando se realiza um balanço de energia, tem de se considerar os fluxos de aquecimento do solo, a evaporação das plantas e solo, a radiação das plantas e solo, radiação da construção e materiais de cobertura, trocas de convecção na superfície do solo, plantas e estufa, armazenamento de calor e trocas de calor durante a ventilação. Na figura 2.5 podem-se visualizar os fluxos principais do balanço de energia (Zabeltitz, 1999).

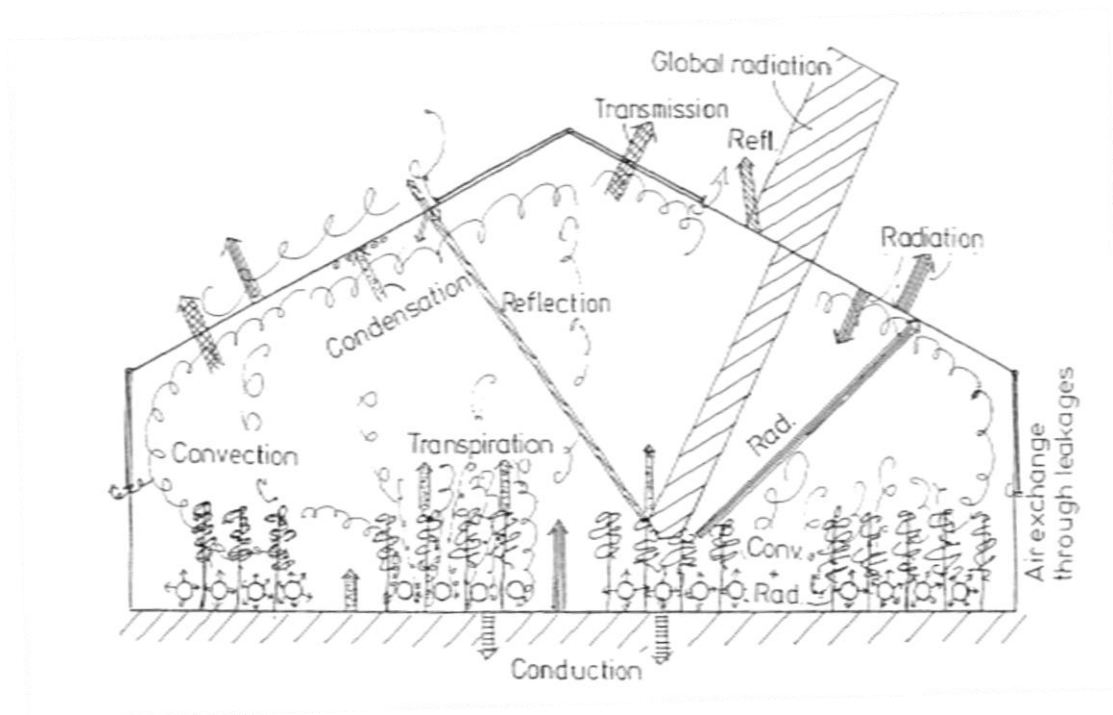


Figura 2.5 - Balanço global de energia numa estufa. Fonte: Zabeltitz, (1999).

O balanço de energia de uma estufa pode ser explicado pela seguinte expressão (ASHRAE, 1985, citado por Zabeltitz, 1999):

$$Q_a + Q_{Rs} + Q_e + Q_r = Q_{cc} + Q_{rt} + Q_{cs} + Q_f + Q_{la} + Q_{se} \quad (2.13)$$

Esta equação está de acordo com a primeira lei da termodinâmica ou lei da conservação de energia, onde o balanço de energia global é nulo, isto é, a soma dos ganhos é igual à soma das perdas. Outra forma de expressar esta lei, é pela diferença entre a energia que entra e sai do sistema. Esta diferença é igual ao aumento da capacidade de retenção de energia pelo sistema (ASHRAE, 2005). No balanço apresentado na equação 2.13, temos do lado das entradas, os ganhos pelo sistema de aquecimento (Q_a , $W m^{-2}$), os ganhos por incidência de radiação solar (Q_{Rs} , $W m^{-2}$), os ganhos devido a equipamentos e máquinas (Q_e , $W m^{-2}$) e os ganhos por respiração das plantas (Q_r , $W m^{-2}$). Como perdas temos as perdas por condução e convecção (Q_{cc} , $W m^{-2}$), perdas de radiação térmica (Q_{rt} , $W m^{-2}$), perdas de condução pelo solo (Q_{cs} , $W m^{-2}$), as perdas por fotossíntese (Q_f , $W m^{-2}$), as perdas de calor latente (Q_{la} , $W m^{-2}$) e as perdas de calor sensível (Q_{se} , $W m^{-2}$).

Existem muitas equações de balanços de energia para estufas, sendo a mais importante a que contempla os componentes existentes em cada estufa, normalmente relacionados com ar, plantas, solo e coberturas (Zabeltitz, 1999). Este autor compila, no seu trabalho, uma listagem de referências bibliográficas de acordo com as diversas componentes estudadas. Baptista et al. (2010) apresenta também uma revisão dos estudos mais recentes sobre este assunto.

Perales et al. (2004) e Perdignes et al. (2005) determinaram a temperatura ambiente dos períodos de tempo seguintes, baseando-se na temperatura anterior e no diferencial de temperatura dado pelo balanço de energia, como consta na eq. 2.14:

$$Ti_{(t)} = Ti_{(t-1)} + \frac{Q_a + Q_{Rs} - U(Ti_{(t-1)} - Te_{(t-1)}) - Q_J(Ti_{(t-1)} - Te_{(t-1)})}{C} \quad (2.14)$$

Para além dos coeficientes apresentados, neste balanço visualiza-se a influência das diferenças térmicas entre o interior (T_i , °C) e exterior (T_e , °C) nos coeficientes relacionados com as perdas de calor sensível como as perdas globais de energia pela cobertura (U , $W m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$) e pelas janelas (Q_J , $W m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$). Nesta equação é visível a influência da capacidade de armazenamento térmico da estufa (C , $W m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$). A capacidade de armazenamento térmico também pode ser denominada de inércia térmica.

Perales et al. (2008a), ao efectuar estudos com sistemas de nebulização, incluiu esta variável (perdas de calor latente por vaporização de água do sistema de nebulização Q_n , $W m^{-2}$) na equação anterior (2.14) passando a ser representada da seguinte forma:

$$Ti_{(t)} = Ti_{(t-1)} + \frac{Q_a + Q_{Rs} - U(Ti_{(t-1)} - Te_{(t-1)}) - Q_J(Ti_{(t-1)} - Te_{(t-1)}) - Q_n}{C} \quad (2.15)$$

Outra componente a considerar, principalmente em climas Mediterrâneos, no contexto de aquecimento global, é a existência de outros sistemas de arrefecimento evaporativo como a utilização do sistema de painel evaporativo, tal como foi estudado por Kittas et al. (2003) e Fuchs et al. (2006).

Abdel-Ghany et al. (2006) apresentam outra equação onde consideram também a influência das plantas na determinação da temperatura, embora seja muitas vezes

desprezado por ser um valor muito pequeno, relativamente aos outros coeficientes (Coelho, 2005).

Das equações acima referidas (2.13 a 2.15), cada componente apresentada é por sua vez calculada por outra fórmula ou determinada por métodos estatísticos. A determinação dos coeficientes por métodos estatísticos, como os efectuados por Perales et al. (2004) e Perdigones et al. (2005), é efectuada por interacção, em ensaios conduzidos de acordo com estratégias de controlo fixas. As determinações dos coeficientes pelos cálculos físicos, dada a sua especificidade, são seguidamente apresentadas.

Ganhos de calor devidos ao sistema de aquecimento

A necessidade de calor de uma estufa, de uma forma simplificada, pode ser determinada a partir da sua área (A_e , m²) do coeficiente global de perdas de calor pela cobertura (U , W m⁻² °C⁻¹) e da diferença de temperatura objectivo (temperatura interior (T_i) e temperatura exterior (T_e)) como se mostra na equação 2.16 (López, 2001);

$$Q_a = A_e U (T_i - T_e) \quad (2.16)$$

No entanto, a energia emitida para a estufa vai depender do combustível utilizado, da eficiência do equipamento e da capacidade de transferência de calor relativo ao tipo de equipamento utilizado. González-Real e Baille (2000) demonstram como variam as necessidades energéticas em função de distintos sistemas de aquecimento, como é distribuída essa energia e ainda qual é o efeito nas plantas, tudo isto com base em temperaturas objectivo do ar e condições meteorológicas exteriores iguais.

Quando se utilizam sistemas de aquecimento com tubagens aquecidas, normalmente por água quente, a potência emitida está relacionada com a diferença de temperaturas entre os tubos e o ambiente envolvente. Estas diferenças dependem ainda da área de transferência de calor e das características dos tubos condutores (comprimento e diâmetro) (Braak, 1995). No caso dos sistemas de aquecimento por ar, a transferência de calor depende, para além da diferença de temperaturas entre a superfície de troca de calor, da velocidade do ar (Braak, 1995). Como o cálculo das potências emitidas são algo complexas, os equipamentos normalmente trazem ábacos para o cálculo e correcção das potências emitidas.

Ganhos de calor devidos à radiação solar.

Os ganhos de calor devidos à incidência da radiação solar (Q_i , $W m^{-2}$) são calculados em função da transmissibilidade do material da cobertura (τ) da percentagem de radiação solar (R_s) que é convertida em calor sensível (b), de acordo com a equação 2.17 (Perales et al, 2004 e Perdighones et al, 2005).

$$Q_{R_s} = \tau b R_s \quad (2.17)$$

Waaijenbergh (1995) refere que para o vidro a transmissibilidade se encontra entre 0,83 e 0,89 caso seja luz difusa ou directa. Zabeltitz (1999) refere valores entre 0,89 e 0,92 para os mesmos casos. Perales et al. (2003) e Perdighones et al. (2005) utilizaram nos seus estudos valores que contemplam a transmissibilidade da cobertura e a percentagem da radiação solar que é convertida em calor sensível (τb), de 0,3 na ausência de ecrã térmico e de 0,075 com ecrã térmico, tendo sido validados estes valores nas experiências em causa.

Coeficiente de perdas de calor pela cobertura

As perdas de calor pela cobertura são caracterizadas globalmente como o coeficiente “ U ” ($W m^{-2} ^\circ C^{-1}$), que contempla todas as perdas pela cobertura (condução, convecção, infiltração e radiação) que são proporcionais à diferença entre a temperatura interior e exterior, e pode ser determinado pela equação 2.18 (Rodríguez, 2009).

$$U = \frac{Q_a}{(T_i - T_e)} \quad (2.18)$$

Braak (1995) indica que, na Holanda, a determinação deste coeficiente é efectuada para uma temperatura exterior de $-8^\circ C$, uma temperatura interior de $20^\circ C$ e com vento a uma velocidade de $4 m s^{-1}$. Nestas condições, uma estufa coberta com vidro simples, requer um fornecimento de energia de $246 W m^{-2}$ para a manutenção da temperatura objectivo, sendo o valor deste coeficiente $8,8 W m^{-2} ^\circ C^{-1}$.

As alterações das condições de determinação deste coeficiente, levam a que existam diferentes valores para os mesmos materiais de cobertura. Assim, Castilla (2005) indica valores compreendidos entre 6,1 e $5,5 W m^{-2} ^\circ C^{-1}$, em função do estado de nebulosidade do céu e Zabeltitz (1999) indica valores entre 6 e $8,8 W m^{-2} ^\circ C^{-1}$.

Perdas de calor pelas janelas

As perdas de calor pelas janelas (Q_j , $W m^{-2}$) são devidos às trocas de ar entre o interior e o exterior pela abertura de janelas. As perdas podem ser calculadas (eq. 2.19) conhecendo o caudal de ventilação (CV , $m^3 s^{-1}$), a massa volúmica do ar (μ , $1,225 kg m^{-3}$), o calor específico do ar (C_p , $1005 J kg^{-1} ^\circ C^{-1}$), a área da estufa (A_e , m^2) e a diferença de temperaturas (ΔT) entre o ar interior e o exterior (Zabeltitz, 1999).

$$Q_j = \frac{CV\mu C_p}{A_e} \Delta T \quad (2.19)$$

O caudal de ventilação é influenciado pela impulsão térmica e pelo efeito do vento, mas este assunto já foi abordado no ponto 2.1.2.2 deste trabalho.

Perdas de calor por ventilação dinâmica

As perdas de calor por ventilação (Q_v , $W m^{-2}$), são calculadas de acordo com a mesma equação (2.19) que para as perdas pelas janelas mas, neste caso, o caudal de ventilação é função da capacidade e número de ventoinhas instaladas.

Conversão do calor sensível em calor latente por evaporação de água do sistema de nebulização

A evaporação de água, ao mudar do estado líquido para gasoso, é um processo que consome muita energia como já descrito no ponto 2.1.2.2. A conversão de calor sensível em calor latente, por evaporação de água é função da quantidade de água evaporada e do calor latente de vaporização (λ , $MJ kg^{-1}$). Desta forma, a quantidade de calor sensível transformada em calor latente (Q_n , $W m^{-2}$) é dada pela seguinte equação:

$$Q_n = CA\lambda 277,78 \quad (2.20)$$

Onde CA é o caudal de água evaporada ($kg h^{-1} m^{-2}$) e $277,78$ é o factor de conversão de energia de MJ para $W h^{-1}$ (Hanan et al., 1978; Castilla, 2005).

Conversão do calor sensível em calor latente por evaporação de água do painel evaporativo. Embora este sistema de arrefecimento também seja baseado na evaporação de água, existem diversos factores como o caudal de ventilação, a temperatura e humidade exterior e interior, que tornam difícil a quantificação da quantidade de água evaporada.

Fuchs et al. (2006) nos seus estudos, estabeleceram um procedimento que permite a avaliação do calor latente do arrefecimento, através das taxas de transpiração da cultura e da evaporação de água do painel evaporativo. Estes autores propõem que o calor latente por evaporação de água pelo painel evaporativo (Q_p , W m⁻²) seja calculado em função da equação 2.21:

$$Q_p = \left(\frac{\rho C_p}{\gamma} \right) \left(\frac{e_p - e_{ae}}{r_x} \right) \quad (2.21)$$

onde ρ representa a densidade do ar (kg m⁻³), C_p o calor específico do ar seco (1005 J kg⁻¹ °C⁻¹), γ a constante psicométrica ($\approx 0,0667$ kPa °C⁻¹), e_p a pressão de vapor de água que sai do painel evaporativo (kPa), e_{ae} a pressão de vapor de actual exterior (kPa) e r_x a resistência da ventilação (s m⁻¹). A equação 2.22, proposta por Fuchs (2006) permite o cálculo da densidade do ar em função da temperatura (T , °C) e da pressão atmosférica ($P \approx 101,3$ kPa).

$$\rho = 1,293 \left(\frac{273,2}{T + 273,2} \right) \left(\frac{P}{101,3} \right) \quad (2.22)$$

A pressão atmosférica pode ser corrigida em função da altitude (H , m), pela equação 2.23 (Allen et al., 1994).

$$P = 101,3 \left(\frac{293 - 0,0065H}{293} \right)^{5,26} \quad (2.23)$$

Allen et al. (1994) também explicaram como se pode calcular a constante psicométrica em função do calor específico, pressão atmosférica, calor latente (λ , J kg⁻¹) (eq. 2.24), onde ϕ representa a razão dos pesos moleculares do vapor de água/ar seco (0,622).

$$\gamma = \left(\frac{C_p P}{\phi \lambda} \right) \quad (2.24)$$

A resistência da ventilação (r_x , s m⁻¹) é determinada pela equação 2.25, onde R é representada o número de renovações por hora e Z é a altura média da estufa (m).

$$r_x = \left(\frac{3600}{RZ} \right) \quad (2.25)$$

A pressão de vapor de água ambiente (e_{ae}) é determinada pela equação 2.4 (ponto 2.1.1.3 deste trabalho) e ao colocar as variáveis climáticas do exterior, teremos calculada a pressão de vapor ambiente exterior.

A pressão de vapor que sai do painel evaporativo vai depender da sua eficiência, normalmente medida em relação à diferença entre a temperatura que sai do painel evaporativo e a temperatura do bolbo húmido. Lucas et al. (2000) em trabalhos de avaliação deste sistema de arrefecimento concluíram que, nas condições do estudo, se podem obter eficiências de 80%. Conhecendo-se todos estes factores, pode-se calcular finalmente a pressão de vapor que sai do painel evaporativo pela seguinte equação (Fuchs, 2006):

$$e_p = \eta e(T_{ebh}) + (1 - \eta) e_{ae} \quad (2.26)$$

onde η representa a eficiência do painel, $e(T_{ebh})$ a pressão de vapor à temperatura do bolbo húmido. A pressão de vapor ambiente da temperatura do bolbo húmido é calculada pela equação 2.4.

2.1.3.2 - Balanços de massa.

Os balanços de massa estão para o cálculo da humidade como os balanços de energia estão para o cálculo da temperatura. Tal como no balanço de energia, os ganhos e perdas de humidade podem ser determinados por modelos físicos ou estatísticos.

A determinação dos ganhos ou perdas de humidade por métodos estatísticos, em condições de ensaio, é de fácil execução pois é realizada em função de um ajustamento automático, tal como foi demonstrado por Perales et al. (2004), Perdignes et al. (2005 e 2008b) e Afonso (2006), embora esteja dependente da realização de ensaios com diferentes estratégias de controlo.

A determinação de coeficientes para o balanço de massa, por métodos físicos, foi estudada principalmente por Stanghellini e Meurs (1992) e Joliet (1994), sendo descritos por inúmeros autores como Trigui et al. (2001). A principal diferença entre eles é que os algoritmos de Stanghellini e Meurs (1992) são baseados no estabelecimento de um objectivo para a transpiração das culturas, em vez de ser para a temperatura e humidade relativa, enquanto Joliet (1994) desenvolveu um modelo para a previsão da humidade relativa, transpiração das culturas e custos energéticos, baseados em dados climáticos exteriores.

Joliet (1994) propôs o cálculo do balanço de massa baseado no princípio de conservação do vapor no ar da estufa. A variação da concentração de vapor de água no ar da estufa (E_e , $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) está relacionada com a transpiração da cultura (E_t , $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$), os ganhos de água por nebulização (E_n , $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) e as perdas de água por condensação (E_c , $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e por ventilação (E_v , $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

$$E_e = E_t + E_n - E_c - E_v \quad (2.27)$$

Perales et al. (2004) e Perdignes et al. (2005 e 2008b) efectuaram o cálculo do balanço de massa para determinação da concentração de vapor no interior da estufa, após a realização do balanço de energia, em função da concentração de vapor de água (g) por kg de ar seco (C_{ai} , g kg^{-1}). Perdignes et al. (2008b) utilizou como coeficientes a concentração de vapor anterior ($C_{ai(t-1)}$), os coeficientes relativos à evapotranspiração, dividido entre a componente A_1 ($\text{g kg}^{-1} \text{W}^{-1} \text{m}^2 \text{h}^{-1}$) que está relacionado com a radiação solar (R_s , W m^{-2}) e a componente B_1 (h^{-1}) que está relacionada com a diferença entre a concentração vapor saturado (C_{ai}^* , g kg^{-1}) e a concentração de vapor actual (C_{ai} , g kg^{-1}). Como perdas foram utilizados coeficientes que expressam as perdas pela estrutura (K_1 , $\text{g kg}^{-1} \text{g}^{-1} \text{kg h}^{-1}$) e pelas janelas (K_2 , $\text{g kg}^{-1} \text{g}^{-1} \text{kg h}^{-1}$). Estas perdas dependem das diferenças de concentração de vapor de água interior e exterior (C_{ve} , g kg^{-1}).

$$C_{ai(t)} = C_{ai(t-1)} + A_1 R_s + B_1 (C_{ai(t-1)}^* - C_{ai(t-1)}) - K_1 (C_{ai(t-1)} - C_{ae(t-1)}) - K_2 (C_{ai(t-1)} - C_{ae(t-1)}) \quad (2.28)$$

Após o conhecimento da concentração de vapor no interior da estufa, pode-se calcular a humidade relativa (HR) utilizando a equação proposta por Perales et al. (2003) e Coelho et al. (2006):

$$HR_t = 21,325e^{-0,0602T_{is(t)}} C_{ais(t)} - (-0,0438T_{is(t)} + 0,7) \quad (2.29)$$

Onde T_{is} é a temperatura interior simulada ($^{\circ}\text{C}$) e C_{ais} a concentração de vapor interior simulada (g kg^{-1}), tudo isto num determinado instante de tempo (t).

Seguidamente, serão apresentadas mais algumas características inerentes a cada um dos coeficientes necessários para a determinação da humidade relativa no interior de uma estufa.

Concentração de vapor no interior da estufa

O cálculo da concentração de vapor de água em (C_a , g kg^{-1}) pode ser efectuado de acordo com Natdamus (2010) e Abdel-Ghani (2006). Esta equação (eq. 2.30) inclui a massa molar do ar seco (0,029 kg), a massa molar do vapor de água (0,018 kg), a pressão atmosférica total (P) e a pressão actual de vapor de água (e_a , kPa).

$$C_a = \left(\frac{0,018e_a}{0,029(P - e_a)} \right) 1000 \quad (2.30)$$

Ao substituir, na equação 2.30, a pressão de vapor actual (e_a), pela pressão de vapor saturado, pode-se calcular a concentração de vapor saturado (C_a^*). A pressão de vapor saturado e ambiente pode ser determinado pelas equações 2.2 e 2.3 (ponto 2.1.1.3 deste trabalho).

Ganhos de vapor de água por transpiração das culturas.

A transpiração das culturas também é responsável por alguns ganhos de humidade nas estufas (E_t , $\text{mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e, na maioria dos modelos, utiliza-se a equação de Penman-Monteith simplificada (eq. 2.31) pela introdução do aumento da temperatura da folha pela incidência da radiação solar (R_s , W m^{-2}) e pela linearização da relação entre o DPV e a temperatura (Monteith, 1973, citado por Jolliet, 1994 e Baptista, 2007).

$$E_t = \alpha R_s + \beta DPV \quad (2.31)$$

onde α e β são coeficientes (adimensionais) relativos à área foliar da própria cultura e do seu estado vegetativo, R_s é a radiação solar (W m^{-2}) e DPV o défice de pressão de vapor (kPa). Estes ganhos de humidade podem ser determinados caso sejam conhecidos os

respectivos coeficientes, tal como foi efectuado por Jolliet (1994) ou pode-se determinar estatisticamente o valor para cada coeficiente, como apresentou Perales et al. (2004) e Perdignes et al. (2005 e 2008b).

Perdas de humidade relativo a fluxos de calor sensível

As perdas de vapor de água relativas a fluxos de calor sensível, normalmente por renovação do ar, são proporcionais às diferenças entre as concentrações de humidade interiores e exteriores.

Jolliet (1994) e Trigui et al. (2001) nos seus estudos, determinaram as perdas de humidade (E_{se} , $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) em função dos fluxos de calor sensível (Q_{se} , $\text{W m}^{-2} \text{°C}^{-1}$) do balanço de energia, e relacionadas com as diferenças de pressão de vapor de água interior e exterior. A equação proposta por estes autores foi a seguinte:

$$E_{se} = \frac{\left(\frac{Q_{se}}{\Delta T} \right)}{\lambda \gamma} (e_{ai} - e_{ae}) \quad (2.32)$$

onde γ é a constante psicométrica ($\approx 0,0667 \text{ kPa °C}^{-1}$ (Fuchs et al, 2006)), λ o calor latente de vaporização (J kg^{-1}), e_{ai} a pressão vapor actual interior (kPa) e e_{ae} a pressão de vapor actual exterior (kPa). Esta equação permite o cálculo de todos os fluxos de massa que estão relacionados com o calor sensível, como as perdas pela cobertura, pelas janelas e pela ventilação dinâmica.

Perales et al. (2004) e Perdignes et al. (2005 e 2008b), em condições de ensaio, determinaram estatisticamente o calor relativo a este coeficiente (K_1 e K_2).

Ganhos de humidade relativos a fluxos de calor latente.

Jolliet (1994) também propôs uma equação (eq. 2.33) para a determinação das trocas de vapor de água para os fluxos de calor latente (Q_{la} , W m^2), como acontece quando existem perdas de calor por vaporização de água pelos sistemas de nebulização (Q_n) ou de arrefecimento evaporativo (Q_p).

$$E_{la} = \frac{Q_{la}}{\lambda} \quad (2.33)$$

onde E_{la} representa o fluxo de vapor de água ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e λ calor latente de vaporização (J kg^{-1}).

Perdigones et al. (2008a), determinaram o efeito da evaporação de água no arrefecimento das estufas, mas não apresentaram a determinação do seu efeito na concentração de vapor ou na determinação da humidade relativa.

2.2 - Material e métodos

2.2.1 - Estufas e materiais

O presente estudo foi realizado no compartimento destinado á propagação vegetativa nos Viveiros do Furadouro Lda., o viveiro do grupo Altri. Este viveiro está localizado no Olho Marinho, Óbidos junto à estrada nacional 114, e localizado geograficamente a 39°20'21''N e 9°13'38''O, a uma altitude de 34 m (fig. 2.6).



Figura 2.6 Imagem aérea dos Viveiros do Furadouro Lda. Fonte: Google (2011).

Este viveiro tem uma capacidade de produção de 6.000.000 de plantas por via seminal e cerca de 1.000.000 de plantas por via clonal. Para esta produção, o viveiro possui uma área coberta de 9000 m² de estufa tipo “Venlo”, com uma altura média de 5,73 m, coberta por vidro simples e uma zona de aclimação e endurecimento de, aproximadamente, 2 ha. O viveiro tem produção ao longo de todo o ano e todas as áreas de produção estão equipadas com bancadas móveis (fig. 2.7).



Figura 2.7 Bancadas e sistema de movimentação nos Viveiros do Furadouro Lda.

As estufas têm uma orientação Norte-Sul e o compartimento de propagação está situado do lado Oeste. Este compartimento foi modificado em 2006 para a produção vegetativa de *Eucalyptus globulus* Labill., pela técnica de miniestacaria. Nesta modificação, a área total de 2304 m² foi seccionada em duas partes: uma parte a sul com uma área de 672 m² para a produção dos pés-mãe e os restantes 1632 m² para a área de propagação. Dentro da área de propagação existe um estufim de 360 m² que se destina a criar condições mais específicas para as primeiras fases de propagação (fig. 2.8). O estudo climático ocorreu nesta área de 1632 m², por ser aqui que existe o maior número de mecanismos de controlo ambiental como a ventilação natural e dinâmica, aquecimento, nebulização, redes térmicas/sombra e arrefecimento por painel húmido.

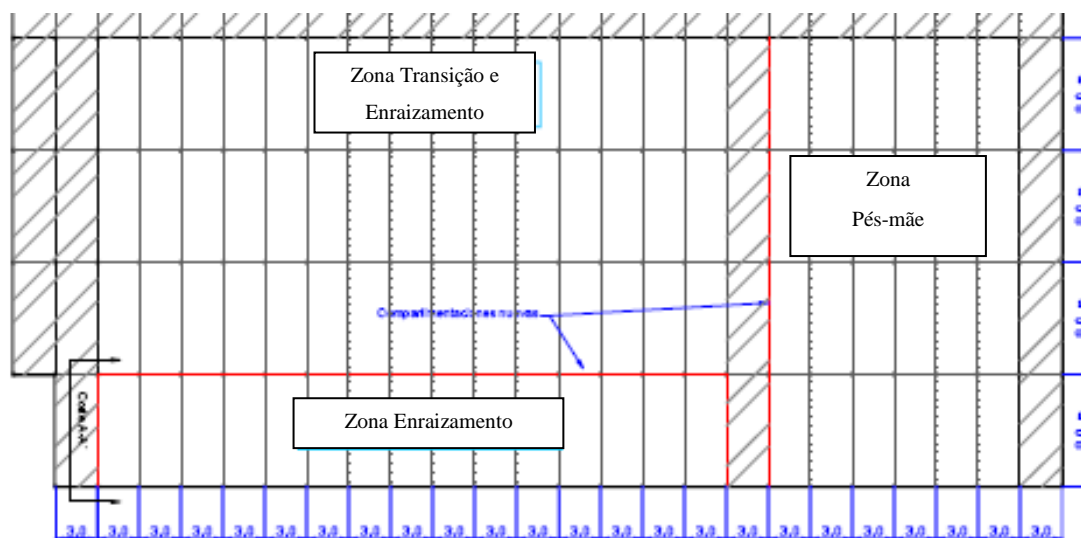


Figura 2.8 - Esquema do compartimento de propagação vegetativa nos Viveiros do Furadouro Lda.

Esta estufa está equipada com um automatismo computadorizado que comanda todos os sistemas de condicionamento ambiental. Seguidamente serão especificadas as especificidades de cada equipamento.

2.2.1.1 - Ventilação natural e dinâmica

A ventilação natural é efectuada por janelas descontínuas na cumeeira da estufa. As estufas do tipo “Venlo” são caracterizadas pela existência de duas capelas por cada nave, existindo 17 janelas por cada capela, 8 do lado Oeste e 9 de Este. As janelas estão automatizadas, com controlo independente de cada lado e, o controlador permite definir as condições de abertura em função da direcção do vento e das condições ambientais exteriores. Cada janela tem um comprimento de 2,2 m e uma abertura de 0,5 m, perfazendo uma área total de 149,6 m². A área de janelas corresponde a 9,16% da área coberta.

Como sistema de renovação de ar complementar, existe a ventilação dinâmica que é composta por 8 ventiladores (VENTIGRAN VGXL-125T-150, de 1,5 cv). Cada ventilador tem 1,375 m de altura, 1,375 m de largura e 0,48 m de profundidade. A capacidade unitária é de 43.000 m³ h⁻¹, totalizando uma capacidade de extracção de 344.000 m³ h⁻¹ o que permite efectuar cerca de 36,74 renovações de ar por hora. Existem ainda 4 ventiladores no estufim de enraizamento (VENTIGRAN VGXL-80T-050, de 0,5 cv), de 16.000 m³ h⁻¹, que

totaliza uma capacidade máxima de $64.000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Embora este sistema tenha uma capacidade de efectuar 6,83 renovações de ar h^{-1} , apenas efectua 0,85 renovações h^{-1} , uma vez que está programado para um funcionamento sequencial (12,5% do tempo). A ventilação dinâmica também é controlada de forma computadorizada, permitindo ser comandada em função de objectivos de temperatura, humidade relativa ou *DPV*, de forma isolada ou em junção com o sistema de arrefecimento evaporativo por nebulização ou painel húmido.

2.2.1.2 - Arrefecimento evaporativo

O sistema de arrefecimento principal é composto pela junção da actuação do sistema de ventilação dinâmica com a humidificação do painel húmido. Este painel húmido está situado na parede Este do compartimento em estudo e tem 1,8 m altura, 45 m de comprimento e uma espessura de 0,1 m o que faz uma área total de 81 m^2 (aproximadamente 1 m^2 de painel para 20 m^2 de área coberta). O painel húmido é constituído por uma estrutura alveolar do tipo ninho de abelha, de 5 mm e ângulos de 90° e é construído em celulose corrugada (CELdeck da MUNTERS). O sistema de ventilação dinâmica tem uma distância de 32 m do painel húmido.

O sistema de nebulização, embora provoque arrefecimento por evaporação de água, está dedicado principalmente à humidificação do ar, pelo que será descrito no ponto 2.2.1.3.

2.2.1.3 - Humidificação

A humidificação do ar é efectuada por um sistema de nebulização de água com gotas de $20 \mu\text{m}$ de diâmetro. Este sistema é composto por 96 bicos de nebulização com um caudal de $6,5 \text{ l h}^{-1}$ aspergidos a 70 bar de pressão (alta pressão). A capacidade máxima de vaporização de água é de $0,382 \text{ l h}^{-1} \text{ m}^{-2}$. A água utilizada por este sistema é ultra filtrada por um sistema de osmose inversa, para a eliminação dos sais existentes na água, evitando assim a obturação dos bicos e a precipitação de sais sobre as plantas.

2.2.1.4 - Controlo da radiação solar

O controlo da radiação solar no compartimento em estudo é efectuada por uma rede aluminizada (Aluminet 70 I). Esta rede tem uma percentagem de sombreamento de 70 a 75%, uma passagem de 25 a 30% de luz directa e 45% de luz difusa. As redes são abertas

(sem plástico entre malha aluminizada) e são indicadas para utilização dentro de estufas. Para além da sua utilização como redes de sombra, estas redes também podem ser utilizadas na protecção contra geadas e como forma de redução do consumo da energia pelo sistema de aquecimento (Polysack, 2010).

Neste viveiro as redes são utilizadas como redes de sombra, fechando por intensidade de radiação solar e também para protecção contra a geada/poupança de energia, de acordo com a temperatura exterior.

2.2.1.5 - Aquecimento

O sistema de aquecimento neste compartimento é do tipo convectivo, composto por 8 termoventiladores (ROCA, UL-215) aquecidos por água a alta temperatura e projecção forçada de ar quente. Cada termoventilador tem uma capacidade unitária de $30.900 \text{ kcal h}^{-1}$ com temperatura da água de 80°C e temperatura de entrada de ar de 15°C . Como 1 kcal h^{-1} é equivalente a $4,187 \text{ kJ h}^{-1}$ (Hanan et al, 1978; Castilha, 2005) a potência máxima emitida é de $176,617 \text{ W m}^{-2}$.

Como a potência irradiada nestes equipamentos depende da temperatura da água e da temperatura do ar interior da estufa, a correcção da potência tem de ser efectuada em função da diferença entre a temperatura da água real e a temperatura de entrada do ar ($\Delta T_{\text{agua-ar}}$). Esta diferença, colocada na função $y = 0,0158 \Delta T - 0,0457$, permite calcular o coeficiente de correcção da potência do termoventilador.

A temperatura da água no interior da estufa é controlada por uma válvula de mistura (válvula de 3 vias), que mistura a água em recirculação dentro da estufa com a água que vem da caldeira. A caldeira (DSV – VRX 1500) tem uma capacidade de produzir 1500 Mcal ($\approx 1745 \text{ kW h}$) e trabalha a uma temperatura máxima de 110°C . Este equipamento está programado para a manutenção de uma temperatura entre 75 e 85°C .

2.2.1.6 - Controlo dos equipamentos e sensores

O controlo de todos os equipamentos de condicionamento ambiental é efectuado por um sistema computadorizado com o software CLIMAGRO[®]. Este software é um sistema aberto de controlo, adaptado em função das características e especificidades dos objectivos de controlo. Quase todos sistemas actuam de forma proporcional com a activação percentual

de cada sistema (50% de activação quando está no valor objectivo) mas existe a opção de o tornar em activação ON/OFF ou controlo proporcional, integral e derivado. Podem ser definidos ainda diversos objectivos em função de horários pré-definidos.

O controlador monitoriza constantemente a radiação solar, temperatura, humidade relativa e *DPV* no interior dos diversos compartimentos e ainda as condições climáticas externas (radiação solar, temperatura, humidade relativa, presença de chuva, direcção e velocidade do vento), através de estação meteorológica.

A estação meteorológica é composta por:

- ✓ Sonda de direcção e velocidade do vento (PROGRES®) com leitura de ângulos 0 a 360° e velocidades de 0 a 160 km h⁻¹;
- ✓ Sensor de precipitação (KRIWAN®) (presença/ ausência de chuva);
- ✓ Sensor de temperatura e humidade relativa (PROGRES®) com leitura de -10 a +60°C ($\pm 1,5^\circ\text{C}$) e de 0 a 100% de HR, com um desvio de $\pm 2\%$;
- ✓ Sensor de radiação solar (PROGRES®) com leitura de 0 a 2000 W m⁻².

As condições meteorológicas interiores são monitorizadas por um sensor de temperatura e humidade relativa (VAISALA® HMW40) com leitura de -10 a +60°C ($\pm 0,3^\circ\text{C}$) e de 0 a 100% de HR, com um desvio menor que 3% para leituras entre 10 e 90%. Esta sonda está protegida da incidência directa da luz solar e da rega, possuindo um sistema de ventilação que mantém um fluxo de ar contínuo. Existe também uma sonda de radiação solar (PROGRES®) com leitura de 0 a 2000 W m⁻², que mede a radiação que chega ao interior da estufa, por baixo das redes de sombra.

2.2.1.7 - Recolha de dados

A recolha de dados para a realização do modelo de previsão da temperatura e humidade relativa, decorreu entre o dia 2 de Janeiro e 31 de Agosto de 2010. Depois de obtidos os valores simulados para a temperatura e humidade relativa, foi calculado o *DPV* de igual forma ao realizado pelo software CLIMAGRO®.

A aquisição de dados ambientais e estados de funcionamento dos equipamentos, foi efectuada também pelo software CLIMAGRO®. Este software efectua a cada 8 minutos o

registo de todas as variáveis, incluindo sensores e estado de activação de equipamentos e valores objectivos.

Da estação meteorológica foram recolhidos:

- ✓ Temperatura, °C
- ✓ Humidade relativa, %
- ✓ Radiação solar, W m^{-2}
- ✓ Velocidade do vento, km h^{-1}
- ✓ Direcção do vento (0° N ; 180° S)
- ✓ DPV, kPa
- ✓ Ausência/ Presença de chuva (0/1)

Dos dados climáticos interiores foi registado:

- ✓ Temperatura, °C
- ✓ Humidade relativa, %
- ✓ Radiação solar, W m^{-2}
- ✓ DPV, kPa

Nos dados de funcionamento dos equipamentos são registados os estados de activação e o valor objectivo para cada sistema existente no compartimento onde foi elaborado o modelo climático. Os sistemas existentes são:

- ✓ Sistema de Aquecimento ar
- ✓ Sistema de controlo de temperatura da água para aquecimento - Válvula de 3 vias.
- ✓ Sistema de arrefecimento evaporativo - painel
- ✓ Sistema de nebulização
- ✓ Sistema de ventilação dinâmica
- ✓ Sistema de ventilação natural - janelas nascentes e janelas poentes
- ✓ Sistema de sombreamento

2.2.3 - Balanços de energia e massa

A realização dos balanços de energia e de massa vai permitir prever a temperatura e a humidade relativa e, após a sua validação, modelar e definir estratégias de controlo e

funcionamento dos equipamentos, de acordo com os objectivos pretendidos. Após a previsão da temperatura e da humidade relativa simulada, pode-se calcular o *DPV*.

No modelo apresentado são efectuadas as seguintes *assumpções*: não existe condensação, a evaporação do solo é negligenciável, não existem ganhos de vapor de água vindos do exterior da estufa, a temperatura da cultura não afectam a pressão de vapor nos estomas (temperatura da cultura e temperatura ambiente são iguais) e a velocidade das ventoinhas é constante, logo o caudal de ventilação também é constante.

A determinação dos coeficientes, nos modelos climáticos, foi efectuada por cálculos físicos de termodinâmica e/ou por métodos estatísticos, em função do estabelecimento de várias estratégias de controlo e pela monitorização dos dados ambientais.

O estudo foi realizado numa estufa em plena produção, impossibilitando a programação de diferentes estratégias de controlo, pelo risco de poder comprometer a produção do viveiro. Desta forma, ficou impossibilitada a determinação dos coeficientes exclusivamente por métodos estatísticos, tal como foi efectuado por Perales et al. (2004), Perdignes et al. (2005), Coelho et al. (2006) e Perdignes et al. (2008b). Por apenas existem os sensores utilizados na monitorização e controlo da estufa, faltam sensores e dados para o desenvolvimento de um modelo físico como os realizados por Jolliet (1994), Trigui et al. (2001) e Baptista (2007).

Assim, e com os dados disponíveis, relativos às condições ambientais e estado de activação de cada equipamento, tentou-se criar um modelo dinâmico, baseado (i) no cálculo físico dos coeficientes de acordo com as características da estufa e equipamentos existentes, e (ii) pelo seu ajuste com base em métodos estatísticos. Este ajuste foi efectuado para verificar a influência das redes de sombra/térmicas sobre todos os outros sistemas de condicionamento ambiental existentes na estufa.

2.2.3.1 - Balanços de energia

A previsão da temperatura interior foi efectuada através da junção entre os balanços de energia, desenvolvidos por Perales et al. (2004), Perdignes et al. (2005) e Perdignes et al. (2008b) (eq. 2.14 e 2.15) e pelo acréscimo dos coeficientes necessários para contemplar todos os equipamentos e características da estufa em estudo. Assim, a equação geral do

balanço de energia utilizada para a previsão da temperatura interior, foi efectuada pela resolução da equação 2.34.

$$Ti_{(t)} = Ti_{(t-1)} + \frac{Q_a + Q_{Rs} - Q_{cc} - Q_j - Q_v - Q_n - Q_p}{C} \quad (2.34)$$

A previsão da temperatura interior num determinado instante $Ti_{(t)}$, é calculada com base na temperatura interior no instante anterior $Ti_{(t-1)}$, e no diferencial de temperatura que ocorre nesse instante. No cálculo da variação de temperatura entram os ganhos e as perdas de energia que influenciam a capacidade térmica da estufa (C , $W\ m^{-2}\ ^\circ C^{-1}$). Como ganhos foi considerada a energia fornecida pelo sistema de aquecimento (Q_a , $W\ m^{-2}$) e pela incidência de radiação solar (Q_{Rs} , $W\ m^{-2}$). Do lado das perdas e relativamente às alterações de calor sensível, consideraram-se as perdas de calor pela cobertura (Q_{cc} , $W\ m^{-2}$), as perdas pelas janelas (Q_j , $W\ m^{-2}$) e pela ventilação dinâmica (Q_v , $W\ m^{-2}$). Nas perdas de energia, que actuam pela transformação de calor sensível em calor latente, consideraram-se as perdas por evaporação de água pelo sistema de nebulização (Q_n , $W\ m^{-2}$) e pelo painel evaporativo (Q_p , $W\ m^{-2}$).

Extracção dos coeficientes e ajustes do balanço de energia

Cada coeficiente do balanço de energia foi determinado pelo cálculo físico de cada coeficiente e o ajustamento estatístico, de acordo com o estado de funcionamento das redes de sombra. Este ajustamento automático baseou-se na equação da recta (Φ , eq. 2.35) e na ferramenta SOLVER[®] do Microsoft Excel[®].

$$\Phi = Declive \cdot (y_i : y_f ; x_i : x_f) AR + y_i \quad (2.35)$$

Onde y representa os valores do eixo das ordenadas (de ajuste) correspondentes aos valores do eixo das ordenadas, em função do estado de activação das redes (AR , %) (eixo das abcissas - x). As redes têm abertura mínima de 0% (sem redes) e máximo de 100 % (com redes). Os valores das ordenadas foram determinados estatisticamente pela ferramenta SOLVER[®] do Microsoft Excel[®]. O Solver, ou solucionador, faz parte de um conjunto de ferramentas de análise de hipóteses, que permite encontrar um valor optimizado para uma fórmula numa célula de destino, por alteração de outras células ajustáveis. No presente caso a fórmula da célula de destino foi o somatório das diferenças absolutas entre as

temperaturas medidas e simuladas a cada instante (8 minutos), analisadas para cada dia (24 horas) de forma independente. Desta forma, o Solver calculou os valores do eixo das ordenadas para que o somatório das diferenças absolutas fosse mínimo. Esta ferramenta é utilizada primeiro no ajuste de todos os parâmetros utilizados no balanço de energia e posteriormente no balanço de massa.

Na extracção dos factores de ajustamento dos coeficientes, foram colocadas restrições para valores entre “0” e “1”. Os factores de ajustamento são, na realidade, as expressões obtidas pela equação da recta (Φ).

Apresenta-se, em seguida, a metodologia de cálculo de cada coeficiente do balanço de energia.

Ganhos de calor devidos ao sistema de aquecimento

O cálculo dos ganhos de calor provenientes do sistema de aquecimento (Q_a , $W\ m^{-2}$), a ar quente por termoventiladores (permutadores de calor aquecidos a água quente e ar movimentado, através de um ventilador que dissipa pela estufa o ar aquecido pelo permutador de calor) foi efectuado pela resolução da seguinte equação:

$$Q_a = 176,617 FP \frac{AA}{100} \Phi_a \quad (2.36)$$

O sistema de aquecimento tem uma potência de $176,617\ W\ m^{-2}$ e está estabelecido para uma temperatura do ar de $15^\circ C$ e água a $80^\circ C$. Esta potência tem de ser corrigida por um factor de correcção de potência (FP), indicado pelo fornecedor do equipamento (eq. 2.37). Esta equação permite efectuar a correcção da potência, em cada instante, em função da diferença entre a temperatura da água e do ar que entram no termoventilador. Para além desta correcção de potência, só existe dissipação de calor pela estufa quando a parte da ventilação está a activa (AA , %).

$$FP = 0,0158 \Delta T_{\text{água-ar}} - 0,0457 \quad (2.37)$$

Para o ajustamento deste coeficiente (Φ_a , adimensional), foi colocada a restrição para que os valores de ajustamento se encontrassem entre 0 e 1.

Ganhos de calor devidos à radiação solar

Os ganhos de calor devidos à incidência radiação solar Q_{Rs} (W m^{-2}), foram calculados pela multiplicação da radiação solar instantânea pela transmissibilidade (τ) da cobertura e pela fracção de energia que é transformada em calor sensível (b), de acordo com a equação 2.17. No entanto, neste trabalho foi determinado directamente pela equação de ajuste (Φ_{Rs} , adimensional), calculado automaticamente pelo Solver. Este ajuste foi extraído com a restrição que permite apenas valores superiores ou iguais a 0,075 e menores ou iguais a 0,5.

$$Q_{Rs} = R_s \Phi_{Rs} \quad (2.38)$$

Perdas de calor pela cobertura

As perdas pela cobertura (Q_{cc} , W m^{-2}) foram obtidas pela multiplicação da equação da perda global de calor pela cobertura (Φ_{cc} , $\text{W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$), pelas diferenças de temperatura interior e exterior (ΔT , $^\circ\text{C}$). Por sua vez, a equação da perda global pela cobertura foi determinada pelo ajustamento das perdas globais pela cobertura (U , $\text{W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) pela recta de ajustamento (Φ_U , adimensional).

$$Q_c = \Phi_{cc} \Delta T \quad (2.39)$$

$$\Phi_{cc} = 6\Phi_U \quad (2.40)$$

Após alguns testes preliminares, e de acordo com os valores de referência publicados na bibliografia, foi seleccionado o valor de $6 \text{ W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ para as perdas globais de calor pela cobertura (U).

O ajustamento das perdas globais de calor pela cobertura, de acordo com o estado de abertura das redes, foi condicionado para valores entre 0 e 1 para o modelo de arrefecimento e entre 0,67 e 1 para o modelo de aquecimento.

Perdas de calor pelas janelas

A equação das perdas de calor pelas janelas (eq. 2.19) foi adaptada de forma a permitir efectuar os cálculos nesta situação específica. A modificação efectuada foi a multiplicação

pela equação de ajuste das perdas pelas janelas (Q_j , adimensional) em função das redes de sombra. A expressão resultante das alterações é a seguinte:

$$Q_j = \left(\frac{CV\mu C_p}{A_e} \Delta T \right) \Phi_j \quad (2.41)$$

Os cálculos dos caudais de ventilação ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) devido ao efeito combinado da impulsão térmica e do efeito do vento, propostos por Boulard e Baille (1995) na equação 2.6, também tiveram que sofrer alteração devido ao sistema de aquisição de dados e registo. A área de janelas a cada instante tem de ser calculada de acordo da média (\bar{x}) do estado de abertura (%) das janelas nascente (JN) e poente (JP), multiplicada pela área máxima de abertura das janelas (A_j , m^2). Outra alteração efectuada foi o cálculo da altura da abertura da janela a cada instante, que é efectuada também pela percentagem média de abertura das janelas, mas multiplicando-se agora pela altura máxima de abertura (h_j , m).

Para os coeficientes de descarga das janelas C_d , foi utilizado o valor de 0,68 (quadro 2) e para coeficiente global de pressão do vento C_v , o valor seleccionado foi de 0,1 (quadro 1, ponto 2.1.2.2).

A equação 2.42 reflecte as alterações efectuadas à equação inicial e é utilizada quando existe o efeito combinado de impulsão térmica e o efeito do vento, isto é, quando se observa uma temperatura interior superior à temperatura exterior. No caso de haver inversão térmica, temperatura interior inferior à temperatura exterior, deixa de haver impulsão térmica e o caudal de ventilação passa exclusivamente a ser efectuado pelo efeito do vento, utilizando-se então a equação 2.43.

$$CV = \frac{\left(\frac{\bar{x}(JN : JP)}{100} A_j \right)}{2} C_d \left(2g \frac{\Delta T}{T_e^o} \frac{\left(\frac{\bar{x}(JN : JP)}{100} h_j \right)}{4} + C_v V_v^2 \right)^{0.5} \quad (2.42)$$

$$CV = \frac{\left(\frac{\bar{x}(JN : JP)}{100} A_j \right)}{2} C_d (C_v V_v^2)^{0.5} \quad (2.43)$$

Na expressão de ajuste deste coeficiente (Φ_j , adimensional) foram permitidos valores entre 0 e 1.

Perdas de calor por ventilação dinâmica.

O cálculo das perdas de calor são efectuadas pela resolução da equação de perdas pelas janelas (eq. 2.41) mas neste caso, o caudal de ventilação (CV) é dado directamente pelos caudais de ventilação das ventoinhas e pela expressão de ajuste da ventilação dinâmica (Q_v , adimensional). Assim, o cálculo do caudal de ventilação foi efectuado pela soma dos caudais instantâneos da ventilação do compartimento de transição VT ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$), com os caudais instantâneos da ventilação do compartimento de enraizamento VE ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$). O caudal instantâneo foi calculado pela multiplicação do estado de activação de ventilação dos ventiladores, AV_t e AV_e (%), que são multiplicados pelos respectivos caudais de ventilação, VT e VE.

$$Q_v = \left(\frac{CV \mu C_p}{A_e} \Delta T \right) \Phi_v \quad (2.44)$$

$$CV = \frac{AV_t}{100} \frac{VT}{3600} + \frac{AV_e}{100} \frac{VE}{3600} \quad (2.45)$$

Na expressão de ajuste, tal como nas perdas por ventilação, foram permitidos valores entre 0 e 1 para este coeficiente (Φ_v , adimensional).

Perdas de calor por evaporação de água do sistema de nebulização

A transformação do calor sensível em calor latente, por vaporização de água do sistema de nebulização Q_n (W m^{-2}) foi efectuada pela adaptação da equação do cálculo do calor latente de vaporização de água (λ , eq. 2.12). Dadas as características das gotas produzidas pelo sistema de nebulização (20 μm de diâmetro) considerou-se que toda a água pulverizada é evaporada antes de tocar nas plantas, substrato ou solo.

A modificação, tal como nas anteriores, começa pela multiplicação do estado de activação do sistema de nebulização (AN , %) pelo caudal máximo de água nebulizado por cada intervalo de leituras (CA_n , $0,051 \text{ kg m}^{-2} 480 \text{ s}^{-1}$), e depois multiplicado pelo calor latente de vaporização de água (λ , MJ kg^{-1}) e pela equação de ajuste do modelo em função do estado de abertura das redes (Φ_n , adimensional).

$$Q_n = \left(\frac{AN}{100} CA_n \lambda \right) \Phi_n \quad (2.46)$$

Na equação de ajuste deste coeficiente, foram permitidos valores entre 0 e 1.

Perdas de calor por evaporação de água do painel evaporativo

A perda de calor pela evaporação de água pelo painel evaporativo Q_p (W m^{-2}) passa pela adaptação da equação 2.21. A primeira modificação efectuada foi a multiplicação pelo estado de activação do painel evaporativo AP (%).

$$Q_p = \frac{AP}{100} \frac{\rho C_p}{\gamma} \frac{e_p - e_{ae}}{r_x} \quad (2.47)$$

Para que ocorra arrefecimento evaporativo, para além da humidificação do painel, tem de existir também uma elevada taxa de renovação de ar. Para que a renovação seja considerada e automatizada, o coeficiente de resistência da ventilação r_x (eq. 2.23) tem de ser afectado pelo estado de ventilação AV (%) e depois multiplicada pelo número de renovações de ar máximas permitidas pelo sistema de ventilação, R (36,74 renovações h^{-1}) e pela altura média da estufa, $Z = 5,7375$ m.

$$r_x = \left(\frac{\frac{3600}{AV} RZ}{100} \right) \Phi_v \quad (2.48)$$

Como o sistema de ventilação dinâmica é o responsável pela renovação de ar, utilizou-se a equação de ajuste obtida para esse coeficiente de forma isolada (Φ_v , adimensional).

O cálculo do coeficiente relativo à pressão de vapor de água que sai do painel evaporativo, e_p (eq. 2.26), também foi adaptado, para minimizar o erro do modelo e contemplar o efeito das redes de sombra. A alteração foi efectuada para a modificação do coeficiente que se refere à eficiência (η) do painel evaporativo, passando esse rendimento a ser calculado em função da expressão de ajuste do painel evaporativo (Φ_p , adimensional), ajustado automaticamente pelo Solver. Para o ajuste foram permitidos valores entre 0 e 1. Nesta equação (2.49), é necessário calcular a pressão de vapor à temperatura do bolbo húmido e, a inexistência destas sondas levou a que fosse necessário proceder a sua determinação.

$$e_p = \Phi_p e(T_{ebh}) + (1 - \Phi_p) e_{ae} \quad (2.49)$$

A temperatura do bolbo húmido exterior foi determinada exclusivamente para os pontos onde existiu activação do sistema de arrefecimento pelo painel húmido. Este cálculo foi efectuado por integração utilizando a ferramenta Solver já referida. Nesta situação, a célula de destino foi a equação de cálculo da humidade relativa (eq. 2.47) pelo ajuste da T_{bh} (célula de ajuste) para que a humidade relativa calculada fosse igual à medida.

$$HR = \left[\frac{0,611 \exp\left(\frac{17,27T_{bh}}{T_{bh} + 237,3}\right) + 0,0665(T_{bs} - T_{bs})}{0,611 \exp\left(\frac{17,27T_{bs}}{T_{bs} + 237,3}\right)} \right] 100 \quad (2.50)$$

Após a obtenção do valor da temperatura do bolbo húmido, e por substituição deste valor na equação 2.4, obtém-se a pressão de vapor à temperatura do bolbo húmido:

$$e(T_{bh}) = 0,611 \exp\left(\frac{17,27T_{bh}}{T_{bh} + 237,3}\right) \quad (2.51)$$

Desta forma foi possível determinar as perdas de energia pelo sistema evaporativo.

Capacidade de calorífica da estufa

O cálculo da capacidade calorífica da estufa (C) foi determinado directamente pela equação de ajuste (Φ_{Ce} , $W m^{-2} ^\circ C^{-1}$), pelo Solver. Depois de inúmeras tentativas, os valores foram restringidos entre 40 e 60 $W m^{-2} ^\circ C^{-1}$.

2.2.3.2 - Balanços de massa

Os balanços de massa, para a determinação da concentração de vapor de água no interior da estufa (C_{vi} , $g kg^{-1}$), foram realizados pela combinação entre a equação 2.27 (Joliet, 1994) e a equação 2.28, utilizada por Perales et al. (2004) e Perdigones et al. (2005 e 2008b). Da junção destas equações resultou a seguinte equação:

$$C_{ai(t)} = C_{ai(t-1)} + A_2 R_s + B_2 (DPV) + \Psi_n + \Psi_p - \Psi_e - \Psi_j - \Psi_v \quad (2.52)$$

onde $C_{ai(t-1)}$ representa a concentração de vapor anterior ($g kg^{-1}$); A_2 o coeficiente relativo à evapotranspiração, que está relacionado com a radiação solar ($g kg^{-1} W^{-1} m^2$); R_s a radiação solar ($W m^{-2}$); B_2 a componente da evapotranspiração ($g kg^{-1} kPa^{-1}$), que está

relacionada com o DPV (kPa); Ψ_n os ganhos de vapor por nebulização de água (g kg^{-1}); Ψ_e as perdas de vapor pela cobertura (g kg^{-1}); Ψ_j e Ψ_v as perdas de vapor pela ventilação natural e dinâmica (g kg^{-1}) e Ψ_p os ganhos de vapor pela evaporação de água pelo painel evaporativo (g kg^{-1}).

Após a determinação da concentração de vapor de água, foi determinada a humidade relativa pela equação 2.29.

De seguida serão especificadas as metodologias de extracção dos valores do balanço de massa.

Extracção dos coeficientes e ajustes do balanço de massa

Neste balanço, a determinação dos coeficientes também combinou a metodologia utilizada por Perales et al. (2004), Perdígones et al. (2005 e 2008b) e Jolliet (1994), na medida em que a componente da evapotranspiração foi determinada por métodos estatísticos e os restantes valores, foram determinados em função dos fluxos de energia, previamente calculados e ajustados no balanço de energia, para a estufa em estudo.

Ganhos de vapor de água relativo à evapotranspiração

Os coeficientes relativos à evapotranspiração A_2 e B_2 foram determinados directamente pela equação de ajuste, em função do estado de abertura das redes (eq. 2.35), e pelo ajustamento do modelo pela ferramenta Solver. Estes coeficientes deram origem às expressões Φ_{A2} ($\text{g kg}^{-1} \text{ W}^{-1} \text{ m}^2$) e Φ_{B2} ($\text{g kg}^{-1} \text{ kPa}^{-1}$). O critério de ajuste permite que só tenham sido considerados valores superiores ou iguais a 0.

Ganhos de vapor de água relativos a fluxos de calor latente

Os fluxos de calor latente (Q_{la}) por evaporação de água pelo sistema de nebulização (Q_n) e pelo painel evaporativo (Q_p), foram transformados em fluxos de vapor de água, Ψ_n e Ψ_p respectivamente, pela transformação da equação 2.33 proposta por Jolliet (1994) e Trigui et al. (2001):

$$\Psi_{la} = \left(\frac{Q_{la}}{\frac{\lambda}{V_g}} \right) V_e t 10^3 \quad (2.53)$$

onde V_g representa o volume da estufa ($5.7375 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2}$), V_e o volume específico do ar seco em ($\text{m}^3 \text{ kg}^{-1}$), t o tempo entre leituras e 10^3 o factor de conversão de kg para g.

Segundo Albright (1990), o volume específico pode ser calculado de acordo com a seguinte equação:

$$V_e = \frac{1}{P} R_a T^o (1 + 1,6078r) \quad (2.54)$$

onde P representa a pressão atmosférica (Pa), R_a a constante do gás perfeito ($287,055 \text{ J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$), T^o a temperatura em $^\circ\text{K}$ e r a razão de mistura (kg kg^{-1}). A razão de mistura foi calculada da mesma forma que a concentração de vapor de água, pela utilização da equação 2.30.

Perdas de vapor de água relativo a fluxos de calor sensível

A transformação da equação 2.32 proposta por Jolliet (1994) permite agora a conversão dos fluxos de calor sensível (Q_{se} , W m^{-2}) em fluxos de massa (Ψ_{se} , g kg^{-1}). Como fluxos de calor sensível consideram-se as perdas pela cobertura (Q_{cc} , W m^{-2}), as perdas pelas janelas (Q_j , W m^{-2}) e pela ventilação dinâmica (Q_v , W m^{-2}).

$$\Psi_{se} = \left(\frac{\left(\frac{Q_{se}}{\Delta T} \right) (e_{ai} - e_{ae})}{\frac{\lambda \gamma}{V_g}} \right) V_e t 10^3 \quad (2.55)$$

Desta forma foram determinadas as perdas de água pela cobertura (Ψ_e), pelas janelas (Ψ_j) e pela ventilação mecânica (Ψ_v).

2.2.4 - Análise de dados e validação dos modelos

Após verificação prévia, os dados foram separadas de acordo com a época do ano. Foram assim seleccionados os registos de 2 de Janeiro a 13 de Março de 2010, para o modelo de aquecimento e os dados de 1 de Julho a 31 de Agosto, para o modelo de arrefecimento. Em

cada dia em análise foram estudados todos os registos, com intervalo de 8 minutos, que ocorreram nas 24 horas.

Nos dados referentes ao modelo de aquecimento, foram estudados 28 dias (Fevereiro) para a determinação dos coeficientes e os restantes dias (37) foram utilizados para a validação do modelo.

A selecção de dados, para a realização do modelo de arrefecimento, incidiu sobre os 31 dias do mês de Agosto para extrair os coeficientes e os 31 dias mês de Julho, foram utilizados para a validação do modelo. A extracção dos coeficientes no mês de Agosto resultou da existência de mais um dia (8 no total), com activação do sistema de arrefecimento pelo painel húmido, do que no mês anterior.

Após a determinação dos coeficientes de cada modelo, foi testado um modelo único, pela utilização dos valores médios dos modelos anteriores, sendo testado nos mesmos períodos de validação.

A comparação entre os valores de obtidos em função do ajuste do modelo e do estado de activação das redes, foi efectuada através de comparação simples entre os valores obtidos, teste de Student, utilizando o software SPSS v15.0.

Para a validação do modelo foi efectuado o teste ANOVA utilizando o software SPSS v15.0. Como medidas de ajustamento entre os valores medidos e simulados foram utilizadas as diferenças médias absolutas e a raiz do erro quadrático médio (RMSE), também conhecido como o erro padrão da estimativa.

$$RMSE = \sqrt{MSE} \quad (2.56)$$

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (y'_i - y_i)^2}{n} \quad (2.57)$$

2.3 - Resultados e discussão

2.3.1 - Resultados da extracção dos coeficientes e ajustes do modelo

Salienta-se que os coeficientes Q_{Rs} , Q_{cc} , C , A_2 e B_2 são representados pelas suas equações de ajustamento (determinados estatisticamente), e foram colocados, respectivamente, na equação geral do balanço de energia e no balanço massa, enquanto os restantes coeficientes resultaram de cálculos físicos ajustados para a estufa em estudo, de acordo com o estado de abertura das redes de sombra/térmicas.

2.3.1.1 - Modelo de aquecimento

Os coeficientes para o modelo de aquecimento, foram extraídos nos 28 dias do mês de Fevereiro de 2010. Primeiro extraíram-se os coeficientes do balanço de energia e em seguida do balanço de massa. Após a determinação de todos os coeficientes diários, foram efectuadas médias dos coeficientes obtidos e efectuada uma análise estatística (teste t), para verificar a existência de diferenças significativas entre os valores de ajustamento, em função da abertura das redes de sombra/térmicas.

No quadro 2.3 encontram-se os resultados das equações de ajuste dos coeficientes e os valores de ajustamento, em função do estado de abertura de redes, para o modelo de aquecimento.

Pode-se dizer que existe um efeito significativo ($P < 0,05$) das redes nos valores de ajustamento utilizados no modelo. No entanto, não existem diferenças significativas ($P > 0,05$) para o ajuste das perdas de condução e convecção pela cobertura (Φ_{cc}), ajuste do sistema de nebulização (Φ_n), ajuste do painel evaporativo (Φ_p) e para a componente da evapotranspiração relacionada com a radiação solar (Φ_{A2}).

A fracção de energia solar que é transformada em calor sensível é muito baixa, dados os baixos valores obtidos no coeficiente que conjuga esta energia com a transmissibilidade do material de cobertura (Φ_{Rs}). No entanto, o valor com redes (0,118) está acima dos valores utilizados e validados por Perales et al. (2003) e Perdigones et al. (2005) (0,075). Para a situação sem as redes, o coeficiente determinado é substancialmente inferior ao utilizado pelos autores acima referidos, dado que validaram o valor de 0,3 e o valor extraído neste balanço foi de 0,197. Ao considerar-se um valor de transmissibilidade da cobertura média

de 0,8825 (média dos valores apresentados por Waaijenberg, 1995 e Zabeltitz, 1999), a componente da radiação que é transformada em calor sensível situa-se entre os 22,3% sem redes e 13,4% com as redes de sobra estendidas. Pode-se dizer também que a presença das redes reduz os ganhos de energia em aproximadamente 40%.

Quadro 2.3 - Equações de ajustamento dos coeficientes e respectivos valores de ajuste, em função do estado de abertura de redes, para o modelo de aquecimento (valores com a mesma letra não são estatisticamente diferentes, $P > 0,05$).

Coeficientes	Equação de ajuste dos coeficientes	Valor sem redes (0%)	Valor com redes (100%)
QRs (adimensional)	$\Phi_{Rs} = -0,001x + 0,197$	0,197a	0,118 b
Qcc (W.m-2.°C-1)	$\Phi_{cc} = 4,02$	4,02 a	4,02 a
Qa (adimensional)	$\Phi_a = 0,003x + 0,535$	0,535 b	0,818 a
Qj (adimensional)	$\Phi_j = 0,005x + 0,361$	0,361 b	0,832 a
Qv (adimensional)	$\Phi_v = 0,008x + 0,005$	0,005 b	0,844 a
Qn (adimensional)	$\Phi_n = -0,001x + 0,994$	0,994 a	0,956 a
Qp (adimensional)	$\Phi_p = 1$	1,000 a	1,000 a
C (W.m-2.°C-1)	$\Phi_{Ce} = -0,049x + 54,715$	54,715 a	49,847 b
A2 (g.kg-1.W-1.m2),	$\Phi_{A2} = 2 \times 10^{-5}x + 0,001$	0,001 a	0,003 a
B2 (g.kg-1.kPa-1)	$\Phi_{B2} = -0,004x + 0,861$	0,861 a	0,482 b

As perdas de energia do coeficiente global de perdas de energia pela estrutura (Φ_{cc}) não são influenciadas pelas redes de sombra/térmicas, nesta altura do ano, e podem estar relacionadas com o estado de funcionamento dos equipamentos e com as condições climáticas verificadas. As redes estão quase sempre estendidas, dado fecharem a temperaturas exteriores inferiores a 12°C, e o sistema de aquecimento está quase sempre a trabalhar. Durante o dia, com baixa intensidade de luz (menor que 300 W m⁻²), as redes estão abertas, mas como a diferença entre as temperaturas interiores e exteriores é mínima, as perdas pela cobertura são também mínimas. Atendendo às considerações referidas, presume-se que o processo de ajustamento não consegue extrair correctamente o valor deste coeficiente. Durante o processo de extracção, os valores de ajuste deste coeficiente tentaram extrair valores inferiores a 4 W m⁻² °C⁻¹ o que, de acordo com as referências bibliográficas, não é aceitável, razão pela qual este valor foi limitado, neste balanço, a valores entre 4 e 6 W m⁻² °C⁻¹.

A explicação dos valores extraídos para os ganhos de energia pelo sistema de aquecimento tem também as mesmas justificações apresentadas para o coeficiente de perdas globais pela estrutura.

O aumento das perdas por ventilação com a presença das redes, pode ser justificada com a maior temperatura verificada acima das redes, no caso das janelas e com a redução do volume e as diferenças de temperatura acima e abaixo das redes.

A capacidade térmica da estufa (Φ_{Ce}), embora exista uma diferença mínima entre os valores, é muito influenciada pelas redes ($P < 0,05$).

Considerando que, no presente estudo se utilizaram os valores das condições ambientais das 24 horas de cada dia em avaliação, em oposição ao estudo de períodos específicos como o aquecimento durante a noite e princípio da manhã (Afonso, 2005) ou a ventilação natural durante o dia (Coelho, 2005), os resultados obtidos são bastante aceitáveis. As múltiplas condições que ocorrem em simultâneo dentro da estufa, condicionam a obtenção de melhores estimativas sobre a eficiência de cada sistema em estudo.

2.3.1.2 - Modelo de arrefecimento

A extracção dos coeficientes do modelo de arrefecimento foi efectuada durante os 31 dias do mês de Agosto de 2010. A metodologia utilizada foi idêntica ao modelo de aquecimento, sendo extraído primeiro os dias com activação do sistema de arrefecimento pelo painel evaporativo (8 dias) e depois foram extraídos os outros dias, sem estimar os valores dos coeficientes referentes a este equipamento, uma vez que não estando activado nesses dias, não tiveram qualquer influência.

Da análise dos coeficientes extraídos (quadro 4), pode-se verificar que neste balanço, de forma geral, existe uma menor influência das redes de sombra sobre os valores de ajuste dos coeficientes. No entanto, existem diferenças significativas ($P < 0,05$) entre os valores máximos e mínimos de ajuste para transmissibilidade da cobertura e transformação da radiação solar em calor sensível (Φ_{Rs}), para o sistema de aquecimento (Φ_a), perdas de calor por vaporização de água do painel evaporativo (Φ_p) e para a capacidade calorífica da estufa (C).

Quadro 2.4 - Equações de ajustamento dos coeficientes e respectivos valores de ajuste, em função do estado de abertura de redes, para o modelo de arrefecimento (valores com a mesma letra não são estatisticamente diferentes, $P > 0,05$).

Coeficientes	Equação de ajuste dos coeficientes	Valor sem redes (0%)	Valor com redes (100%)
Q_{Rs} (adimensional)	$\Phi_{Rs} = -2 \times 10^{-4}x + 0,096$	0,096 ^a	0,076 ^b
Q_{cc} (W.m ⁻² .°C ⁻¹)	$\Phi_{cc} = -0,001x + 5,172$	5,172 ^a	4,182 ^a
Q_a (adimensional)	$\Phi_a = 0,007x + 0,131$	0,131 ^b	0,806 ^a
Q_j (adimensional)	$\Phi_j = 2 \times 10^{-4}x + 0,921$	0,921 ^a	0,936 ^a
Q_v (adimensional)	$\Phi_v = 0,002x + 0,608$	0,608 ^a	0,775 ^a
Q_n (adimensional)	$\Phi_n = 0,001x + 0,924$	0,924 ^a	0,999 ^a
Q_p (adimensional)	$\Phi_p = -0,002x + 0,463$	0,463 ^a	0,238 ^b
C (W.m ⁻² .°C ⁻¹)	$\Phi_{Ce} = 0,070x + 46,093$	46,093 ^b	53,104 ^a
A_2 (g.kg ⁻¹ .W ⁻¹ .m ²),	$\Phi_{A2} = 1 \times 10^{-5}x + 0,001$	0,001 ^a	0,002 ^a
B_2 (g.kg ⁻¹ .kPa ⁻¹)	$\Phi_{B2} = -0,001 + 0,110$	0,110 ^a	0,017 ^a

As baixas necessidades de radiação solar por parte das plantas em produção na estufa, levam a que as redes estejam bastante tempo fechadas (acima de 300 W m⁻²), levando a uma redução de aproximadamente 20% nos ganhos de energia por radiação solar. A componente de transformação da radiação em calor sensível é de 8,7 e 10,9% com e sem redes, respectivamente, se for considerado um valor médio de 0,88 para a transmissibilidade do material de cobertura.

O aumento do valor de eficiência das perdas globais de calor pela cobertura, pode estar relacionado com o facto de existir uma pequena diferença entre as temperaturas interiores e exteriores, tornando menor a influência relativa dos valores de ajustamento deste coeficiente, não alterando, por isso, o valor pré-estabelecido. Esta também é a justificação para a menor variação dos valores. Pode-se dizer que as redes reduzem aproximadamente 19% das perdas pela cobertura.

O sistema de aquecimento nesta época do ano, trabalha quase exclusivamente para a diminuição da humidade, quando o $DPV < 0,3$ kPa, principalmente ao início da manhã, tendo pouca influência no aumento de temperatura. Óbidos está localizado na região Oeste e na costa Atlântica de Portugal, onde o Verão é caracterizado pela ocorrência de nevoeiros no início e fim do dia. O nevoeiro reduz a incidência solar e aumenta a humidade relativa.

Este facto leva a que, quando o sistema de aquecimento está em funcionamento, as redes de sombra/térmicas estão recolhidas (sem redes). Existe também um menor diferencial entre a temperatura da água e a temperatura ambiente, que leva também a uma diminuição da potência irradiada. O facto de não haver aquecimento em situações de forte insolação, quando as redes estão estendidas, pode justificar a alta eficiência do sistema, dado que o ajustamento automático do modelo pode não ter valores que provoquem modificação do valor inicial neste coeficiente.

As pequenas diferenças entre as temperaturas interiores ($\bar{x} = 21,79^{\circ}\text{C}$) e exteriores ($\bar{x} = 22,25^{\circ}\text{C}$), durante o período de extracção dos coeficientes, leva a que o caudal de ventilação por impulsão térmica seja baixo, ou mesmo nulo, dado que a temperatura interior pode ser inferior à exterior. Por outro lado, a baixa velocidade do vento não é suficiente para incrementar o caudal de ventilação. Deste modo, não existem alterações nos valores de ajuste das perdas de energia pelas janelas.

O sistema de nebulização, em condições de temperatura e radiação elevada no exterior, funcionam principalmente quando as redes estão estendidas, o que influencia a determinação deste parâmetro. Outro factor a considerar é o aumento das renovações de ar pela ventilação dinâmica. A baixa humidade relativa do exterior e as necessidades de controlar a evapotranspiração, levam ao aumento da necessidade de evaporação de água. A conjugação destes equipamentos (nebulização e ventilação dinâmica) torna-os num sistema de arrefecimento evaporativo, actuando muitas vezes cumulativamente ao painel evaporativo. A eficiência da remoção de calor sensível pelo painel evaporativo, está assim influenciado pela evaporação de água pelo sistema de nebulização e também pela eficiência de evaporação de água pelo painel evaporativo. O facto do painel se encontra no interior de um compartimento da estufa, a existência de portas abertas para circulação de pessoas e, o facto de este sistema ser activado apenas para condições mais estritas e sempre posteriormente à utilização dos outros equipamentos, que condicionam os ganhos de radiação solar e aumentam as perdas de energia, leva a que exista uma grande redução dos valores das perdas deste equipamento pelo ajustamento.

2.3.1.3 - Modelo único

A realização das médias aritméticas entre os coeficientes dos modelos de aquecimento e de arrefecimento, permite testar a hipótese de haver um modelo único para a modelação do clima da estufa em estudo (quadro 5).

Quadro 2.5 - Equações de ajustamento dos coeficientes e respectivos valores de ajuste, em função do estado de abertura de redes, para o modelo único.

Coefficientes	Equação de ajuste dos coeficientes	Valor sem redes (0%)	Valor com redes (100%)
Q_{Rs} (adimensional)	$\Phi_{Rs} = -0,001x + 0,146$	0,146	0,097
Q_{cc} (W.m ⁻² .°C ⁻¹)	$\Phi_{cc} = -0,005x + 4,596$	4,596	4,101
Q_a (adimensional)	$\Phi_a = 0,005x + 0,333$	0,333	0,812
Q_j (adimensional)	$\Phi_j = 0,002x + 0,641$	0,641	0,884
Q_v (adimensional)	$\Phi_v = 0,005x + 0,307$	0,307	0,810
Q_n (adimensional)	$\Phi_n = 2 \times 10^{-4}x + 0,959$	0,959	0,978
Q_p (adimensional)	$\Phi_p = -0,002x + 0,463$	0,463	0,238
C (W.m ⁻² .°C ⁻¹)	$\Phi_{Ce} = 0,010x + 50,404$	50,404	51,475
A_2 (g.kg ⁻¹ .W ⁻¹ .m ²),	$\Phi_{A2} = 1 \times 10^{-5}x + 0,001$	0,001	0,002
B_2 (g.kg ⁻¹ .kPa ⁻¹)	$\Phi_{B2} = -0,002 + 0,486$	0,486	0,250

No estabelecimento dos coeficientes existe uma excepção nos ajustes do painel evaporativo, por não ter funcionamento no modelo de aquecimento, tendo sido colocado directamente os coeficientes determinados no modelo de aquecimento.

Não são apresentados os resultados estatísticos entre os valores com e sem a presença de redes, dado que são valores médios obtidos nos modelos de aquecimento e arrefecimento. Pela mesma razão, não são justificadas as diferenças.

2.3.2 - Resultados da validação do modelo

2.3.2.1 - Modelo de aquecimento

Depois de extraídos os coeficientes do modelo de aquecimento, este foi validado em 37 dias (30 dias de Janeiro e 7 dias de Março de 2010). Da análise estatística (ANOVA) entre os valores médios medidos e simulados (quadro 2.6), verifica-se que não existem diferenças significativas ($P > 0,05$) para a temperatura e humidade relativa. No *DPV*

existem diferenças significativas ($P < 0,05$), mas recorde-se que esta variável foi calculada com os dados da temperatura e humidade relativa medida e simulada.

Quadro 2.6 - Resultados da análise estatística do modelo de aquecimento (média \pm desvio padrão, SD). (*) Indica diferenças significativas ($P < 0,05$) entre os valores medidos e simulados.

	Valores medidos (média \pm SD)	Valores simulados (média \pm SD)	P
Temperatura (°C)	17,97 \pm 0,70	18,13 \pm 0,75	0,347
Humidade Relativa (%)	74,41 \pm 6,55	70,51 \pm 12,17	0,090
DPV (kPa)	0,53 \pm 0,12*	0,63 \pm 0,27*	0,044

A temperatura média das diferenças absolutas médias diárias, obtida na validação deste modelo, foi de 1,31°C e variou de -1,3 e +1,8°C (fig. 2.9b). A raiz do erro quadrático médio (RMSE), também designado por erro padrão da estimativa, foi de 0,91°C. Na figura 2.9a apresenta-se a relação entre a temperatura simulada *versus* medida e pela análise da recta de regressão obtida, só se consegue explicar aproximadamente 4% dos resultados o que inviabiliza a utilização da equação para a previsão da temperatura simulada em função da medida. Afonso (2005) em modelação do período de aquecimento (das 20 as 11 h) obteve RMSE de 1,4 °C e Baptista et al. (2010) na aplicação de um modelo climático para estufas em Portugal com clima temperado, obteve um RMSE de 1,6°C na validação do modelo, também nas 24 horas do dia e Perdignes et al. (2008b) obtiveram erros médios absolutos entre 1,3 e 2,1°C.

Para a humidade relativa a média das diferenças médias absolutas foi de 7,46%, situando-se as diferenças entre os valores simulados e medidos entre -14.12 e +5.17% (fig. 2.10b). A RMSE foi de 7,65% e pela equação da recta obtida, $y=1,707x-56,507$ (fig. 2.10a) verifica-se que é possível explicar 84% dos resultados simulados (y), em função da humidade medida (x). Estes valores também estão de acordo com outros trabalhos publicados, tendo sido referidos valores de RMSE entre 3,7 e 4,2% (Afonso, 2005) e 6,98 (Baptista et al., 2010). Perdignes et al. (2008b) obtiveram diferenças absolutas de humidade relativa ente 5,7 e 8,8%.

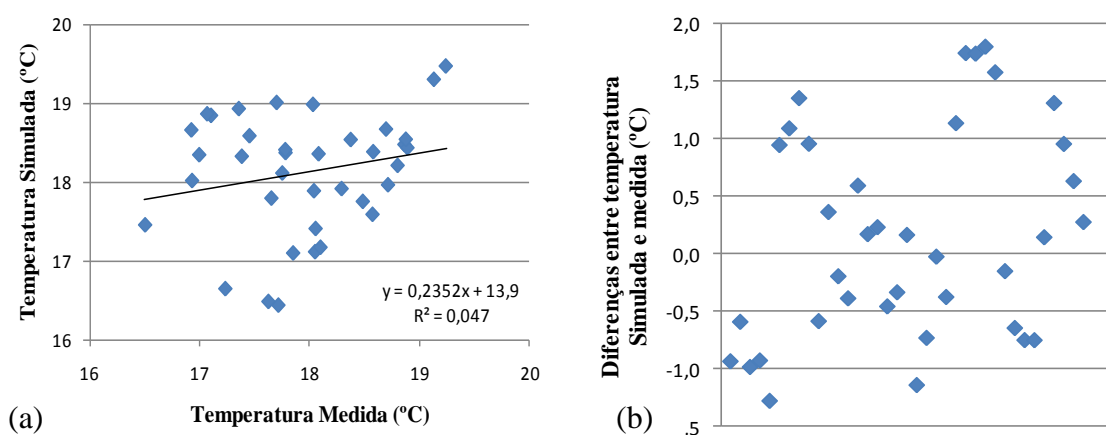


Figura 2.9 - (a) Temperatura simulada *versus* medida e (b) diferenças entre temperatura simulada e medida, no modelo de aquecimento.

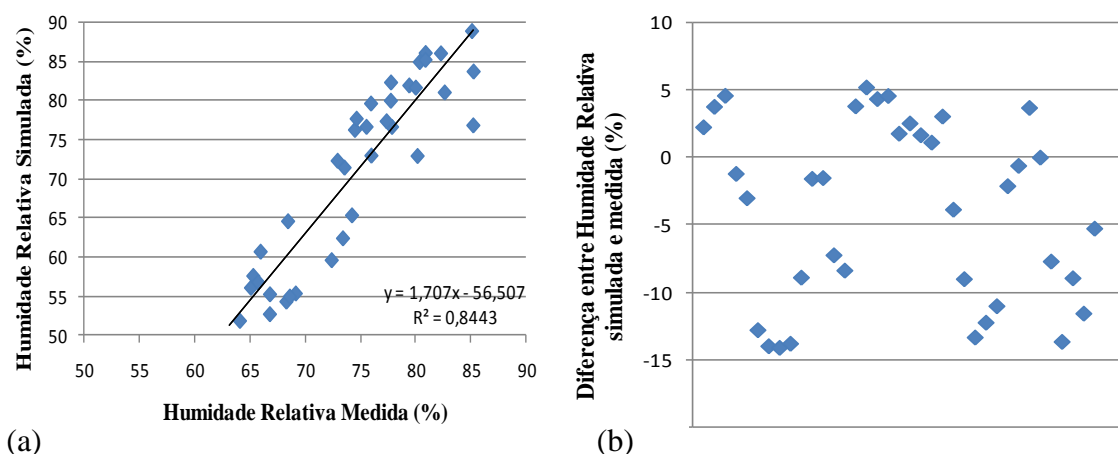


Figura 2.10 (a) Humidade relativa simulada *versus* medida e (b) diferença entre temperatura simulada e medida no modelo de aquecimento.

O défice de pressão de vapor, embora seja uma variável calculada com os dados de temperatura e humidade (medida ou simulada), é uma variável muito importante dado que o controlo da humidade no interior da estufa é efectuado de acordo com este parâmetro.

As medidas de ajustamento desta variável foram de 0,19 kPa para a média das diferenças absolutas médias e 0,20 kPa para o RMSE. As diferenças entre os valores diários medidos e simulados encontram-se no intervalo entre -0,12 e 0,38 (fig 2.11b). Embora existam diferenças significativas entre o *DPV* medido e simulado consegue-se explicar aproximadamente 75% dos valores simulados pelo modelo. O défice de pressão de vapor é

uma variável que cada vez é mais utilizada para a previsão da evaporação e necessidades de rega, tal como tem sido referido por Zolnier et al. (2000) e Abdel-Ghany et al. (2006) (estudos fisiológicos), e não como uma variável climática utilizada para o controlo do ambiente em estufas, sendo por isso difícil de encontrar estudos que permitam a comparação desses valores com os obtidos no presente estudo.

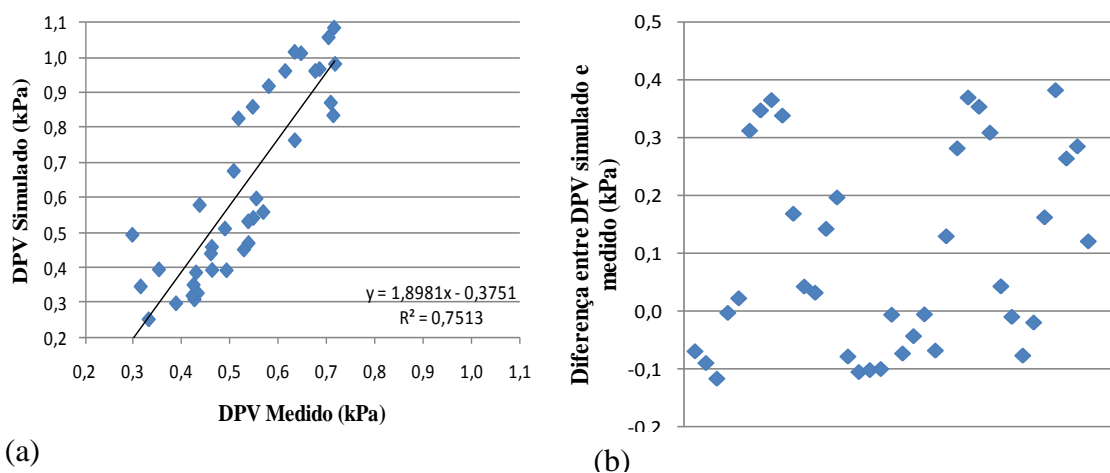


Figura 2.11 - (a) Défice de pressão de vapor (*DPV*) calculado com *T* e *HR* simulada versus calculado com *T* e *HR* medida e (b) diferenças entre *DPV* simulado e medido, no modelo de aquecimento.

Na figura 2.12 encontram-se os valores registados pelas sondas (interiores) e os valores interiores simulados pelo modelo durante 24 horas, entre o dia 21 e 25 de Janeiro de 2010. Nos primeiros quatro dias, as temperaturas médias exteriores estiveram acima dos 13°C, mas no dia seguintes, verificou-se um acentuado arrefecimento nocturno com temperaturas mínimas de aproximadamente 4°C.

Em síntese, os valores obtidos neste trabalho em condições normais de funcionamento, estão de acordo com os valores obtidos em outros trabalhos de modelação climática, muitas vezes em condições de ensaio com estratégias de controlo do ambiente pré-determinadas.

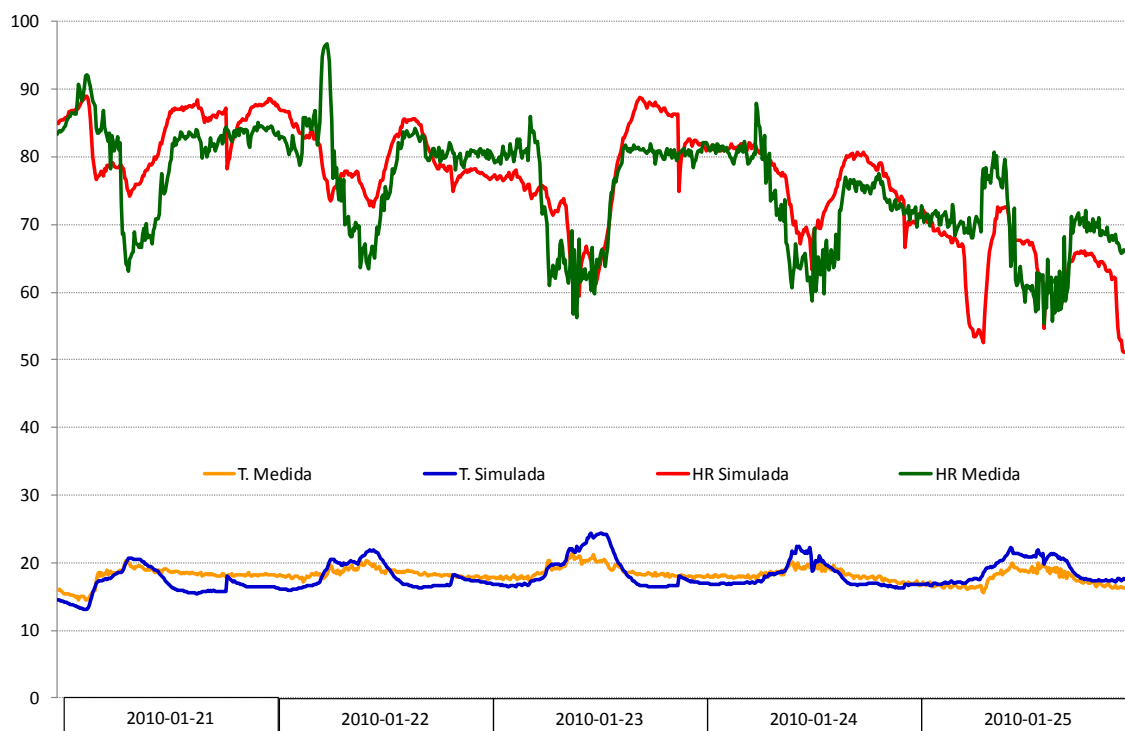


Figura 2.12 - Valores medidos e simulados para a temperatura (T, °C) e humidade relativa (HR, %), no período de 21 a 25 de Janeiro de 2010.

2.3.2.2 - Modelo de arrefecimento

A validação dos coeficientes do modelo de arrefecimento foi efectuada nos 31 dias do mês de Julho de 2010. Da análise estatística (ANOVA) entre os valores medidos e simulados resultou a não existência de diferenças significativas ($P > 0,05$) entre os valores medidos e simulados, para as variáveis climáticas em estudo (temperatura, humidade relativa e *DPV*).

No quadro 2.7 encontram-se os valores observados durante o período de validação dos coeficientes.

Nas medidas de ajustamento dos valores referentes a este modelo obteve-se para a temperatura uma média das diferenças absolutas médias de 0,98°C e um RMSE de 0,79°C.

Na figura 2.13 apresenta-se a relação entre a temperatura medida e simulada, onde 84% da variabilidade dos valores de temperatura simulada pode ser explicada pela equação $y = 1,8694x - 18,883$ (fig. 2.13a), tendo-se verificado diferenças entre estes valores de -0,57 a +2,35°C (fig. 13b).

Quadro 2.7 - Resultados da análise estatística do modelo de arrefecimento (média \pm desvio padrão, SD). (*) Indica diferenças significativas ($P < 0,05$) entre os valores medidos e simulados.

	Valores medidos (média \pm SD)	Valores simulados (média \pm SD)	P
Temperatura (°C)	21,99 \pm 0,65	22,22 \pm 1,32	0,377
Humidade Relativa (%)	79,77 \pm 2,84	78,47 \pm 4,73	0,194
DPV (kPa)	0,57 \pm 0,08	0,65 \pm 0,25	0,095

A humidade relativa, neste modelo, tem uma diferença absoluta média de 6,78% e um RMSE de 4,31%. A diferença entre os dados simulados e reais situam-se entre -11,76 e 4,67% (fig. 2.14b). Na figura 14a que representa a humidade relativa simulada versus medida, verifica-se que só se consegue explicar 23% da variabilidade da humidade relativa simulada.

O DPV na validação dos dados teve uma média das diferenças absolutas médias de 0,24 kPa e um RMSE de 0,23 kPa. Os dados diários tiveram diferenças entre -0,14 e 0,72 kPa (fig. 2.15a). Como esta variável é função da temperatura e humidade relativa, e de acordo com os dados obtidos destas variáveis, apenas se consegue explicar 28% da variabilidade dos valores simulados (fig. 2.15b).

Tal como para o modelo de aquecimento, os valores aqui obtidos no modelo de arrefecimento, são igualmente comparáveis com outros estudos, nomeadamente, Coelho et al. (2006) que comparou quatro sistemas de ventilação numa estufa mediterrânea, obtendo RMSE de 1,6 a 2,5°C para a temperatura e 4,1 a 5,9% para a humidade relativa.

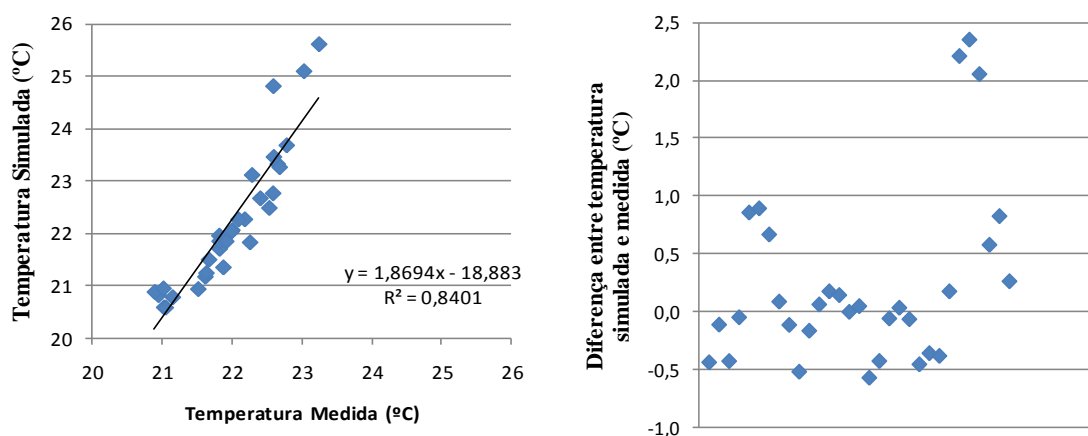


Figura 2.13 - Temperatura simulada *versus* medida (a), e diferenças entre temperatura simulada e medida (b) no modelo de arrefecimento.

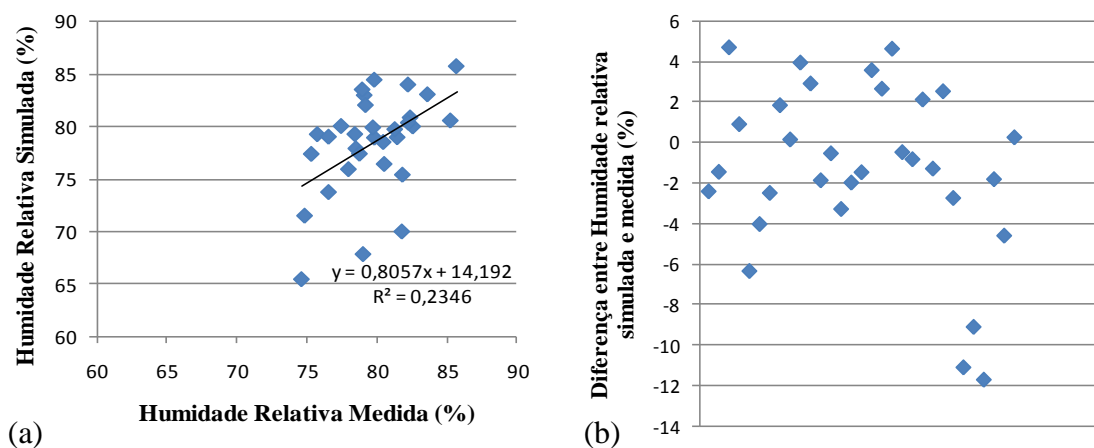


Figura 2.14 - Humidade relativa simulada versus medida (a), e diferença entre temperatura simulada e medida (b) no modelo de arrefecimento.

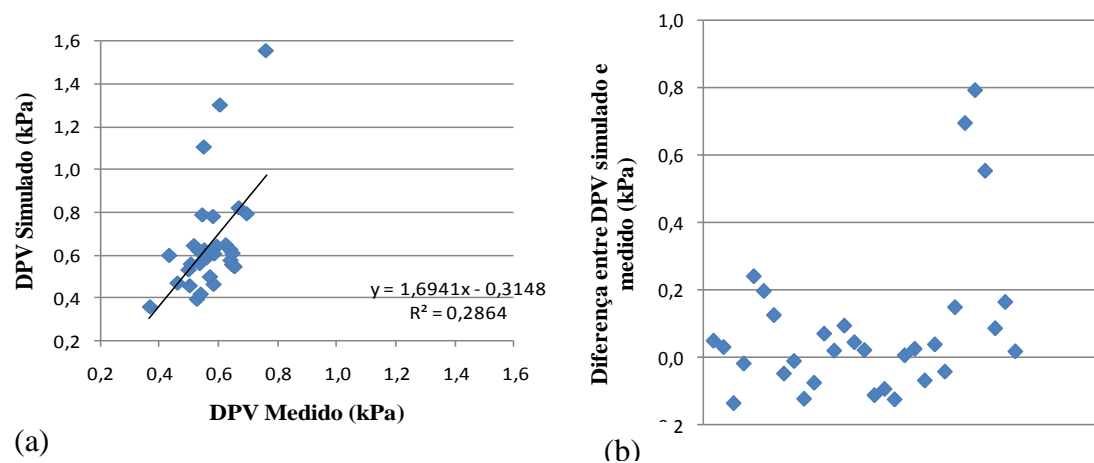


Figura 2.15 - Défice de pressão de vapor (*DPV*) calculado com *T* e *HR* simulada versus calculado com *T* e *HR* medida (a), e diferenças entre *DPV* simulado e medido (b) no modelo de arrefecimento.

Na figura 2.16 estão representados os valores durante 5 dias consecutivos (3 a 7 de Julho 2010) na estufa, onde nos 3 primeiros dias não existiu a activação do sistema de arrefecimento. Verificou-se que o controlo conseguido permitiu a manutenção de uma temperatura igual ou inferior à observada no exterior, o que revela um excelente comportamento de controlo ambiental. Salienta-se que à latitude em que a estufa se encontra, se esta se mantiver fechada e bem regada, podem registar-se temperaturas interiores 20°C acima do verificado no exterior (Castilla, 2005). Verifica-se que durante o dia, a temperatura interior medida e simulada tem um ajuste muito bom, o mesmo

acontecendo com a humidade relativa. Existe, no entanto, um maior desvio quando ocorre o funcionamento do sistema de arrefecimento com o painel húmido e ventilação.

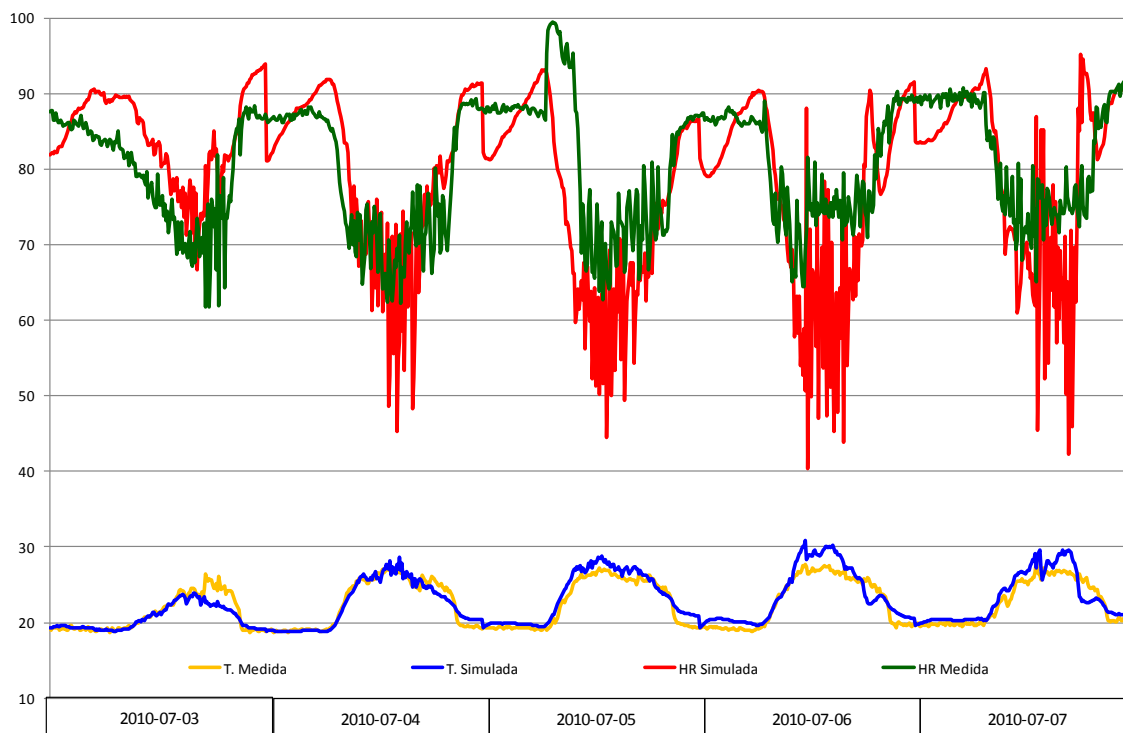


Figura 2.16 - Valores medidos e simulados para a temperatura (T - °C) e humidade relativa HR - %) no período de 3 a 7 de Julho de 2010.

2.3.2.3 - Modelo único

O modelo único, concebido com os valores médios dos coeficientes obtidos nos modelos de aquecimento e de arrefecimento, pretende ser uma tentativa de se obter um modelo geral que consiga prever os dados climáticos no interior da estufa em estudo. A validação dos coeficientes foi efectuada com os mesmos dados utilizados na validação dos dois modelos referidos, num total de 68 dias. No quadro 2.8 encontram-se os valores obtidos para o modelo único, com a respectiva análise estatística, verificando-se que não existem diferenças significativas ($P > 0,05$) entre os valores medidos e simulados para as variáveis temperatura, humidade relativa e *DPV*.

Nas figuras 2.17 a 2.19 encontram-se as relações entre as variáveis climáticas simuladas e medidas, tal como foi efectuado nos modelos anteriores, mas para facilidade de interpretação, os dados de ajustamento encontram-se no quadro 2.9.

Quadro 2.8 - Resultados da análise estatística do modelo único (média \pm desvio padrão, SD). (*) Indica diferenças significativas ($P < 0,05$) entre os valores medidos e simulados.

	Valores medidos (média \pm SD)	Valores simulados (média \pm SD)	P
Temperatura (°C)	19,80 \pm 2,13	18,96 \pm 3,41	0,087
Humidade Relativa (%)	76,85 \pm 5,83	76,54 \pm 11,72	0,843
DPV (kPa)	0,55 \pm 0,11	0,57 \pm 0,26	0,491

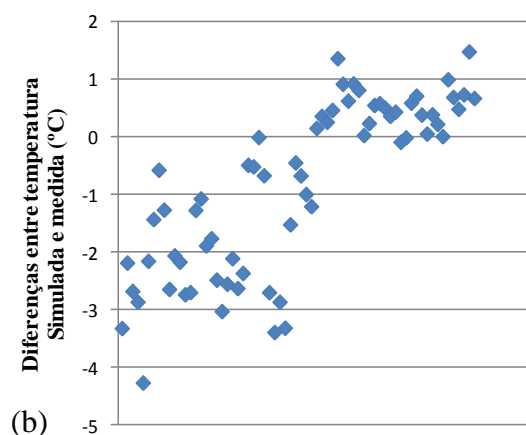
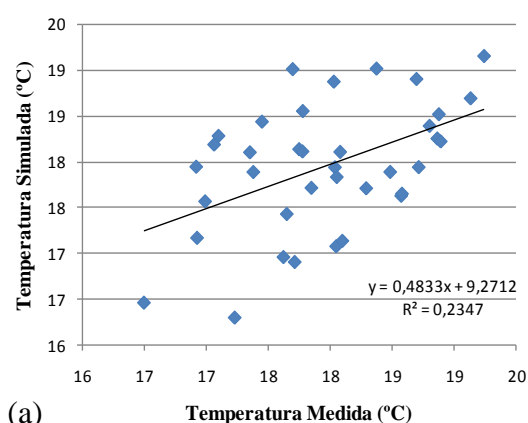


Figura 2.17 (a) Temperatura simulada *versus* medida e (b) diferenças entre temperatura simulada e medida, no modelo único.

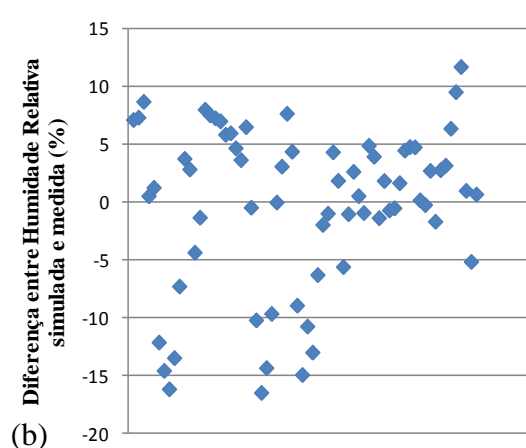
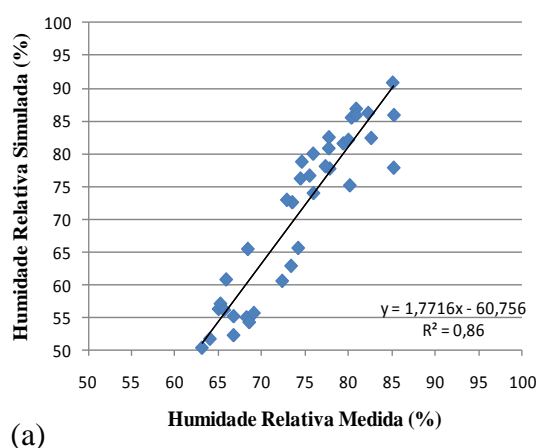


Figura 2.18 - (a) Humidade relativa simulada *versus* medida e (b) diferença entre temperatura simulada e medida, no modelo único.

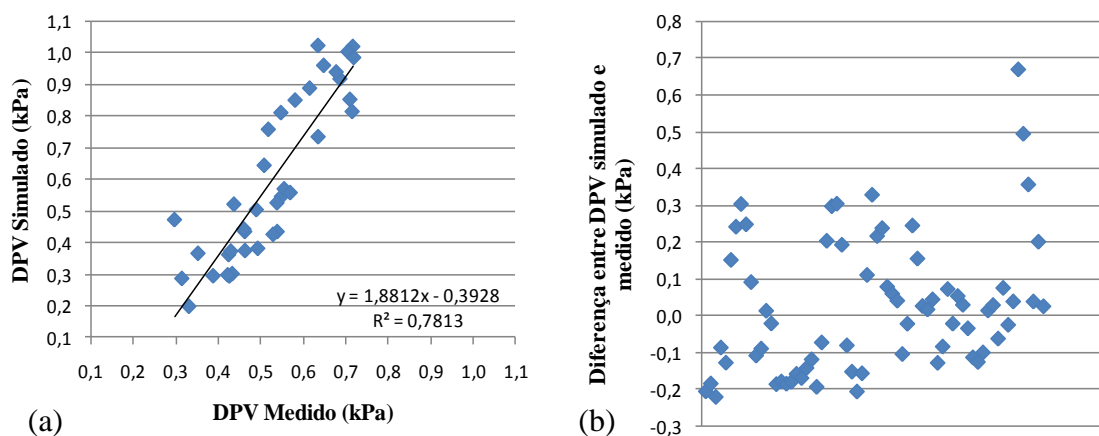


Figura 2.19 - (a) Défice de pressão de vapor (*DPV*) calculado com *T* e *HR* simulada versus calculado com *T* e *HR* medida e (b) diferenças entre *DPV* simulado e medido, no modelo único.

Como as medidas de ajustamento do modelo único têm um menor ajuste (maior diferença), foi verificado se, os dados de validação do modelo de aquecimento e de arrefecimento, isoladamente, apresentavam maior ou menor diferença que os respectivos modelos (quadro 2.9).

Quadro 2.9 - Medidas de ajustamento do modelo único, considerando a validação com os valores médios ou com os valores dos dois modelos separadamente.

Variável climática	Medida de ajustamento	Modelo Único Dados médios	Modelo Único Dados de validação do modelo de aquecimento	Modelo Único Dados de validação do modelo de arrefecimento
Temperatura (°C)	RMSE	1,69	2,22	0,63
	Dif. Absoluta Média	1,99	2,56	1,32
	Intervalo de Diferenças	-4,28 a 1,49	-4,28 a 0	-0,09 a 1,49
Humidade Relativa (%)	RMSE	7,00	8,75	4,00
	Dif. Absoluta Média	9,45	9,17	9,80
	Intervalo de Diferenças	-16,50 a 11,62	-16,50 a 8,61	-5,64 a 11,62
DPV (kPa)	RMSE	0,18	0,19	0,18
	Dif. Absoluta Média	0,25	0,22	0,29
	Intervalo de Diferenças	-0,22 a 0,67	-0,22 a 0,33	-0,13 a 0,67

Comparando as medidas de ajustamento entre o modelo único e o modelo de aquecimento, nos dias de validação do modelo de aquecimento, constatou-se que o modelo único tem um menor ajuste, pois todos os valores são superiores aos obtidos na validação do modelo de

aquecimento. Este facto foi comprovado pela análise estatística entre os valores simulados e medidos do período de aquecimento, com o modelo único (quadro 2.10).

Quadro 2.10 - Resultados da análise estatística dos dados do período de aquecimento - modelo único (média \pm desvio padrão, SD). (*) Indica diferenças significativas ($P < 0,05$) entre os valores medidos e simulados.

	Valores medidos (média \pm SD)	Valores simulados (média \pm SD)	P
Temperatura (°C)	17,97 \pm 0,70*	15,98 \pm 1,04*	0,000
Humidade Relativa (%)	74,41 \pm 6,55	72,43 \pm 14,38	0,449
DPV (kPa)	0,53 \pm 0,12	0,52 \pm 0,29	0,893

Com estes dados verificou-se que os coeficientes do modelo único produzem diferenças significativas ($P < 0,05$) entre as temperaturas medidas e simuladas, embora não existam diferenças significativas ($P > 0,05$) para os valores de humidade relativa e *DPV* medidos e simulados. Assim, a utilização deste modelo único é inviável, não só porque não permite a simulação da temperatura, como também porque não permite a utilização do *DPV*, uma vez que este é calculado em função da temperatura e da humidade relativa simulada. Acresce ainda o facto de que, o cálculo da humidade relativa simulada utiliza os valores de ganhos e perdas dos balanços de energia e, como o modelo não simula de forma estatisticamente aceitável a temperatura, não poderá também resultar em valores aceitáveis de humidade relativa.

Relativamente à utilização dos coeficientes do balanço único no período de arrefecimento, a análise dos coeficientes de ajustamento é mais difícil pois, nas medidas de ajustamento em avaliação, não existe uma clara tendência para que os valores do modelo único sejam superiores ou inferiores, mas o facto de existirem diferenças significativas ($P < 0,05$) para a temperatura e humidade relativa (quadro 2.11), torna inviável a utilização deste modelo único para a previsão de dados climáticos no período de arrefecimento.

Quadro 2.11 - Resultados da análise estatística dos dados do período de arrefecimento - modelo único (média \pm desvio padrão, SD). (*) Indica diferenças significativas ($P < 0,05$) entre os valores medidos e simulados.

	Valores medidos (média \pm SD)	Valores simulados (média \pm SD)	P
Temperatura (°C)	21,99 \pm 0,65*	22,51 \pm 0,87*	0,010
Humidade Relativa (%)	79,77 \pm 2,84*	81,44 \pm 3,58*	0,046
DPV (kPa)	0,57 \pm 0,08	0,62 \pm 0,20	0,136

2.4 - Conclusões

No presente trabalho foi desenvolvido um modelo climático que permite estimar a temperatura e a humidade relativa no interior de uma estufa do tipo “Venlo” de acordo com as condições climáticas exteriores. Com os valores estimados de temperatura e humidade relativa foi possível calcular o défice de pressão de vapor do ar (DPV).

Para os períodos de Inverno (modelo de aquecimento) e de Verão (modelo de arrefecimento), foram extraídos os coeficientes e determinadas equações de ajustamento do modelo em função da abertura das redes de sombra. Estas equações de ajustamento foram depois validadas, no mesmo período em que foram extraídos os coeficientes, mas em diferentes datas.

Desta forma, e escolhendo o modelo mais adequado para a situação em estudo (Verão ou Inverno), pode-se utilizar o modelo para prever a temperatura e humidade relativa no interior desta estufa, podendo ser testadas diferentes condições meteorológicas exteriores (temperatura, humidade relativa, radiação e velocidade do vento) e diferentes estratégias de controlo dos diversos equipamentos. Permite ainda verificar e testar os diferentes valores objectivo de funcionamento ou diferentes algoritmos de controlo. Para além destas funções, os modelos podem também ser utilizados para determinar as necessidades e custos energéticos da utilização da estufa de acordo com os objectivos pretendidos. São no entanto necessários mais estudos deverão ser realizados no sentido de melhorar o ajuste do modelo.

Para além da utilização destes modelos nas condições do presente estudo, a metodologia utilizada na sua concepção permite que estes sejam adaptados a diferentes condições climáticas e a diferentes equipamentos de controlo ambiental de estufas, bastando para tal que sejam extraídos os novos coeficientes, obtendo-se um modelo ajustado às novas condições.

De facto, considerando a grande dependência da propagação vegetativa de *Eucalyptus globulus* Labill. relativamente às condições ambientais em que esta se processa, a utilização de modelos de controlo ambiental nas estufas é uma ferramenta essencial, não só para a gestão destas mesmas condições, como para a previsão dos custos energéticos que as diferentes estratégias de controlo ambiental e os diferentes valores objectivo assumem.

Este trabalho, durante a sua realização, deu origem a dois artigos aceites para apresentação oral em dois congressos internacionais e respectiva publicação, (Anexo1).

3 - INFLUÊNCIA DO CONTROLO AMBIENTAL NA PRODUÇÃO E ENRAIZAMENTO DE MINISTACAS DE *EUCALIPTUS GLOBULUS* LABILL.

3.1 - Introdução

O eucalipto, sendo a espécie florestal com mais área cultivado em todo o mundo, devido ao seu valor económico e rápido crescimento, tem vindo a servir de modelo para o estudo de inúmeros processos fisiológicos (Alfenas et al., 2004, Corrêa e Fett-Neto, 2004 e Cunha et al., 2009). Em Portugal o eucalipto apresenta-se como a segunda espécie com a maior área florestal, com 672.000 ha, depois do Pinheiro bravo que tem uma área de 976.000 ha (AIFF, 2010).

A propagação vegetativa de *Eucalyptus globulus* Labill. assume-se como uma técnica que promove o aumento da produtividade florestal os ganhos esperados nas plantações clonais, relativamente a plantações de material seminal de cruzamentos controlados (Araujo et al 2004). Segundo Araujo et al. (2004), as vantagens da produção clonal são:

- ✓ Ganho genético por geração: Esta técnica permite capturar para além dos genes envolvidos, a sua combinação específica, permitindo capturar os ganhos genéticos aditivos e não aditivos;
- ✓ Ganho genético por unidade de tempo. O tempo mínimo para a realização de um pomar e obtenção de sementes tem um tempo mínimo de 9 anos, enquanto um clone pode ser entregue 1 a 2 anos após a sua selecção;
- ✓ Flexibilidade. Dado que os clones para produção tem uma elevada permanência nos pomares, a propagação clonal permite uma maior flexibilidade na adição ou remoção de novos clones e o avanço do programa de melhoramento.
- ✓ Uniformidade. As plantações clonais são mais uniformes que as provenientes de semente diminuindo os custos de exploração.

Como desvantagens, a propagação clonal de *Eucalyptus globulus* Labill. tem custos mais elevados que a produção seminal, tem maior necessidade de controlo das condições de produção, maior sensibilidade às condições ambientais e exigência de controlo climático e maior dependência de mão de obra qualificada (Araújo et al., 2004).

Considerando que não existem disponíveis na literatura estudos detalhados sobre a influência do controlo ambiental nos factores fisiológicos que determinam o enraizamento e a produtividade de rebentos para o género *Eucalyptus*, pretendeu-se no presente estudo efectuar uma avaliação alargada das variáveis ambientais, de modo a determinar quais as que assumem maior relevância. Os elementos climáticos em estudo foram a temperatura, a humidade relativa, a pressão de vapor do ar e a radiação solar, assim como as variáveis destes elementos climáticos, como por exemplo, a temperatura média, máxima ou mínima, durante períodos de tempo em que decorrem os processos de enraizamento e de produção de miniestacas.

3.1.1 - Localização do viveiro

Para a implantação de um viveiro que inclua estufas de produção de pés-mãe e de enraizamento, a selecção do local, as infra-estruturas utilizadas e a correcta orientação das estufas, são os principais factores que influenciam a obtenção de um processo eficiente de clonagem, nomeadamente de eucalipto (Alfenas et al., 2004). A orientação das estufas tem uma grande influência nas condições climáticas, como a temperatura, a humidade e a luminosidade verificadas no seu interior. Por exemplo, a intensidade da radiação visível pode influenciar fortemente a produtividade e o enraizamento de estacas de eucalipto por redução ou aumento de substâncias fenólicas endógenas, as quais podem agir como inibidores ou promotores desse processo (Assis et al., 2004).

A escolha do local também deve considerar os critérios técnicos que visem a redução e/ou limitação de doenças em viveiros florestais. Assim, devem-se evitar as cotas mais baixas situadas nos vales que, normalmente, estão sujeitas a alagamento, formação de geadas e permanência de temperaturas baixas. A proximidade do viveiro a estradas não pavimentadas é também um factor importante, pois a poeira depositada sobre as estufas vai interferir na quantidade e qualidade de radiação visível. A composição (comprimento de onda) e a intensidade da radiação visível são fundamentais para a fotossíntese. Por um lado a radiação fotossintética activa (PAR), corresponde a cerca de metade da energia solar (Bot e Braak, 1995), e por outro lado, é responsável pela síntese de hidratos de carbono e reguladores de crescimento, necessários à formação dos rebentos e à formação e crescimento de raízes (Alfenas et al., 2004).

Para além dos critérios técnicos, a escolha do local deve também observar critérios económicos, como por exemplo a localização do viveiro relativamente à proximidade com as plantações e a disponibilidade de mão-de-obra. A eficiência de um viveiro está ainda dependente da qualificação da mão-de-obra e do conhecimento e experiência técnica do viveirista.

3.1.2 - Enraizamento de plantas lenhosas

A formação de raízes em estacas é um processo anatómico e fisiológico complexo. Este processo está associado à diferenciação e redirecionamento do desenvolvimento de células vegetais totipotentes para a formação de meristemas que originam raízes adventícias. O enraizamento de miniestacas pode ser influenciado pelo balanço hormonal, pela constituição genética dos materiais vegetais em propagação (clones), pela presença de inibidores e pelas condições nutricionais e hídricas dos pés-mãe. Apesar da evolução técnica para a maximização do enraizamento de *Eucalyptus*, os fundamentos fisiológicos da formação de raízes adventícias são ainda pouco conhecidos (Alfenas et al., 2004; Cunha et al., 2009).

Cunha et al. (2009) indica também que os parâmetros ambientais, como a temperatura e humidade relativa é muito importante para os protocolos de propagação, seja *in vitro* ou em substratos.

Corrêa e Fett-Neto (2004) num estudo, *in vitro*, onde se estudou o efeito da temperatura no desenvolvimento de raízes adventícias, concluiu que o *Eucalyptus globulus* Labill. é mais sensível a altas temperaturas tendo obtido a melhor resposta de enraizamento em ciclos com temperatura diurna de 30°C e nocturna de 20°C. Wilson (1998) concluiu também que as temperaturas mais adequadas para o enraizamento de *Eucalyptus globulus* Labill., em testes em estufas, se encontram no intervalo entre os 20 e 30°C.

O processo de clonagem do eucalipto teve início nos meados do século passado, quando investigadores australianos e franceses multiplicaram várias espécies de eucalipto a partir de plantas seminais e, em 1975, foram instalados cerca de 3000 ha de floresta clonal de eucalipto na República Popular do Congo. Após a introdução da propagação clonal de eucalipto no Brasil, as técnicas de propagação sofreram grandes avanços, especialmente quanto ao método de produção e colheita dos rebentos para estacaria, como o tipo de

substrato, tipos de contendor e modelos da estufa de enraizamento e aclimação (in Alfenas et al., 2004).

A estacaria é, a nível mundial, a principal técnica para a reprodução vegetativa de eucalipto à escala comercial. Na estacaria utiliza-se como propágulo vegetativo uma porção de um rebento jovem com comprimento de 8 a 10 cm, contendo dois pares de folhas seccionadas transversalmente a cerca de um terço do limbo foliar – a macroestaca (Araújo et al., 2004). O propágulo vegetativo utilizado para a realização de macroestacas pode ter amplas origens como a colheita de rebentos de touca em povoamentos florestais, colheita em pés-mãe instalados em parques clonais no interior ou dentro de estufas.

Quanto ao tipo de estacas, de acordo com Alfenas et al. (2004), a macroestacaria apresenta as seguintes desvantagens:

- ✓ Baixa percentagem de enraizamento de clones recalcitrantes à rizogenese;
- ✓ Ocorrência de grandes variações na capacidade de enraizamento entre espécies de eucaliptos;
- ✓ Perda gradual do potencial de enraizamento com o envelhecimento ontogénico dos pés-mãe.

Com o aparecimento da técnica da miniestacaria e microestacaria a maioria das desvantagens da macroestacaria foram eliminadas, tornando mesmo possível a multiplicação comercial de clones de difícil enraizamento (Assis, 1997). A miniestaca é realizada com um propágulo vegetativo com comprimento compreendido entre os 4 e 8 cm de comprimento, possui um ou mais pares de folhas seccionadas transversalmente a cerca de um terço do seu comprimento e conserva o ápice (Araújo et al., 2004).

Apesar das miniestacas serem mais sensíveis a agentes bióticos e abióticos, apresentam as seguintes vantagens, quando comparada com a macroestacaria (Assis, 1997):

- ✓ Menores custos relacionados com a implementação e manutenção das minitouças relativamente ao banco clonal de campo;
- ✓ Maior facilidade de colheita e menores custos com transporte e processamento dos rebentos;

- ✓ A colocação de minitouças em canteiros suspensos sob cobertura fixa ou retráctil, onde os rebentos estão protegidos das condições climatéricas e agentes fitopatogénicos;
- ✓ Maior controlo da rega e nutrição nas minitouças, de forma a obter maior predisposição à rizogenese, especialmente quando são cultivadas em tanques com inundação temporária ou em leito de areia e fertirrigação por gota-a-gota;
- ✓ Maior juvenilidade das miniestacas;
- ✓ Obtenção de plantas com um sistema radicular mais próximo das plantas seminais;
- ✓ Menores variações sazonais na percentagem de enraizamento;
- ✓ Maior velocidade de enraizamento, permitindo a optimização das estruturas do viveiro e diminuição do tempo de exposição das miniestacas a condições favoráveis à incidência de fungos.

3.1.4 - Gestão do parque de pés-mãe

O conjunto de minitouças ou pés-mãe para a produção de rebentos para realização de miniestacas de eucalipto, usualmente mantido em canteiros, denomina-se de minijardim clonal. Existem muitos tipos de minijardins clonais como os conduzidos em canais com fertirrigação por gota-a-gota sob coberto ou ao ar livre, canteiros suspensos ao ar livre com fertirrigação por aspersão e sistemas com inundação temporária sobre abrigo (Alfenas et al., 2004). Com esta técnica é fundamental manter as minitouças com uma altura entre os 6 e 10 cm, pois quanto maior for a proximidade do ponto de colheita e a base de minitouça, maior será o seu enraizamento potencial. Além disso, como a colheita é efectuada de forma selectiva e contínua, consegue-se manter a minitouça num bom estado vegetativo e com um sistema radicular activo, evidenciado pela sua coloração branca (Alfenas et al., 2004).

A colheita selectiva e contínua dos rebentos para enraizamento é feita em intervalos de 4 a 10 dias, dependendo da temperatura, intensidade luminosa e fotoperíodo. A produtividade de rebentos e a sua predisposição ao enraizamento para além dos factores climáticos dependem muito da constituição genética dos clones. Embora os índices de enraizamento dependam muito dos cuidados culturais (nutrição, irrigação, controlo de pragas e doenças e ponto de colheita de rebentos), a optimização destes factores tem pouco efeito no enraizamento de génotipos recalcitrantes à rizogenese. Este aspecto é particularmente

relevante no *Eucalyptus glóbulos* Labill onde a percentagem de génotipos recalcitrante ao enraizamento é muito elevada (Alfenas et al., 2004).

Scarassati (2003) em trabalhos de avaliação ambiental e nutricional da produção de rebentos, em 8 colheitas consecutivas, indicou que existe um aumento de produção de miniestacas quando a humidade relativa atinge 91,7% e diminui para valores superiores a 92,5%. Os valores de temperatura neste estudo variaram entre 26,0°C e 32,7°C, existindo uma tendência para uma queda na produtividade para valores de temperatura acima de 32,7°C. Relativamente à radiação solar este autor referiu que, os valores compreendidos entre 336,7 e 416,9 W m⁻² são adequados à produção de rebentos.

Cunha et al. (2009) utilizou dados climáticos médios mensais de radiação fotossintética activa, humidade relativa e temperatura média, máxima e mínima (entre 2003 e 2005), para relacionar com os resultados obtidos na produção de rebentos e no enraizamento de eucalipto, e concluiu o seguinte:

- ✓ O aumento na intensidade luminosa e a diminuição da humidade relativa do ar favorecem tanto o enraizamento como a produtividade dos rebentos;
- ✓ O enraizamento de miniestacas está também dependente dos clones e do tipo de minijardim clonal e o aumento da temperatura favorece a produção de miniestacas independentemente do tipo de minijardim;
- ✓ Deve ser dada uma especial atenção ao local onde será instalado o viveiro, principalmente quanto às condições climáticas locais.

3.1.5 - Gestão da zona de enraizamento

Apesar de não existirem estudos publicados sobre a influência das condições ambientais sobre a rizogenese do eucalipto, Alfenas et al. (2004) referem os valores de temperatura óptima de 25-30°C na zona de emissão de raízes e de 20-25°C na zona das folhas. Os mesmos autores, considerando que a luminosidade influencia indirectamente o enraizamento, dado que os hidratos de carbono e os reguladores de crescimento são fundamentais para a iniciação e desenvolvimento radicular e, considerando ainda que o eucalipto é uma planta do tipo C₃, recomendam que se devem evitar valores inferiores a 150 µM de fotões s⁻¹ m⁻² (Alfenas et al., 2004).

Na fase inicial de enraizamento é fundamental manter uma fina lâmina de água sobre as folhas, sem contudo permitir acumulação de água e sem provocar encharcamento do substrato. Estas condições são conseguidas através de uma nebulização intermitente mediante bicos de nevoeiro. Após os primeiros 10 a 15 dias do processo de enraizamento, deve-se reduzir gradualmente a frequência da nebulização (Alfenas et al., 2004).

3.2 - Material e métodos

3.2.1 - Estufas

As características do viveiro onde se realizou o presente estudo, pertencente aos Viveiros do Furadouro Lda., do grupo Altri, encontram-se descritas no ponto 2.2 deste trabalho. Para o estudo da influência do controlo ambiental na produção e enraizamento de estacas de *Eucalyptus globulos* Labill. consideram-se, em particular, os compartimentos destinados aos pés-mãe e à zona de enraizamento.

O compartimento dos pés-mãe (fig. 3.1), com uma área de 672 m², está separado internamente das outras áreas por uma parede interior em policarbonato ondulado, e com sistema de controlo climático independente. Nesta área existe um sistema de aquecimento por termoventiladores, um sistema de arrefecimento por painel evaporativo, um sistema de controlo de radiação e ventilação natural e dinâmica. Os pés-mãe estão instalados em bancadas com perlite e possuem rega localizada (gota-a-gota) e sistema de fertirrigação.

A zona de enraizamento (fig.3.2) é constituída por um estufim com 360 m², instalado na zona de transição. Esta zona é fortemente condicionada pelas condições aí existentes, mas também possui controlo climático independente, nomeadamente, um sistema de aquecimento por radiação - convecção a alta temperatura, por tubagem colocada acima do solo e por baixo das bancadas onde são colocadas as plantas a enraizar, um sistema de humedificação e renovação de ar natural (janela lateral) e dinâmica.



Figura 3.1 - Bancadas com pés-mãe (minitouças) para obtenção de miniestacas de *Eucalyptus globulus* Labill., nos Viveiros do Furadouro.



Figura 3.2 - Zona de enraizamento de estacas de *Eucalyptus globulus* Labill., nos Viveiros do Furadouro.

3.2.1 - Produção e enraizamento de estacas

Os rebentos que darão origem às miniestacas são colhidos na estufa dos pés-mãe. Nesta estufa existem 86 bancadas ($6 \text{ m}^2 \text{ bancada}^{-1}$) com aproximadamente 1000 minitouças (pés-mãe) cada. As bancadas estão organizadas em linhas com 10 bancadas cada, onde é produzido um clone por linha.

A produção em estufa, com os equipamentos de condicionamento ambiental existentes, permite a produção contínua de rebentos ao longo do ano. A colheita dos rebentos que reúnem condições de propagação é efectuada todas as semanas. Durante esta operação, para além da colheita dos rebentos aproveitáveis para o enraizamento, é efectuado um controle sobre o número de rebentos existentes em cada minitouça (pé-mãe).

As operadoras colhem o rebento das minitouças e efectuam de imediato a preparação da miniestaca, a miniestaca é um rebento caracterizado por ter entre 5 a 7 cm de altura, com ápice, 3 a 4 pares de folhas e um diâmetro da base entre 1,5 e 2 mm de secção, preferencialmente, arredondada. Com excepção das folhas do ápice, todas as folhas são reduzidas a cerca de $2/3$ do seu comprimento, não devendo as superiores ter comprimento superior às inferiores. Depois de preparada, a miniestaca é colocada num balde, onde fica a aguardar a sua plantação. O tempo entre a preparação e a plantação deve ser o mais curto possível, não excedendo o tempo máximo de quinze minutos. A plantação é efectuada em bancadas móveis com 60 tabuleiros de quarenta alvéolos cada, com uma capacidade de 120 cm^3 por alvéolo (CETAP OPTIM 40). O substrato utilizado é constituído por uma mistura de vermiculite (75%) e turfa (25%), ao qual é adicionado fertilizante para as necessidades das estacas durante as primeiras 5 a 6 semanas.

Fazem parte deste estudo três clones de *Eucalyptus globulus* Labill. (AC58, BC422 e GM258) e um clone híbrido de *E. cypellocarpa* x *E. globulus*. Foram analisados os parâmetros de produção (PRO, rebentos $\text{m}^{-2} \text{ semana}^{-1}$) e o enraizamento (ROT, % semana^{-1}) de rebentos aproveitáveis para a miniestacria. Na figura 3.3 observa-se a irregularidade de produtividade obtida ao longo do ano de 2010, para cada material vegetal e na figura 3.4 o enraizamento obtido nas mesmas semanas.

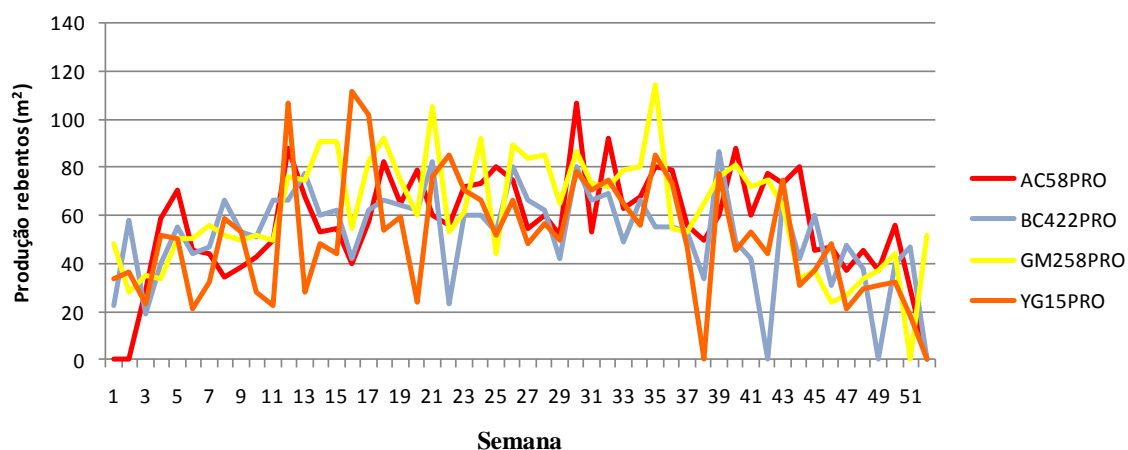


Figura 3.3 - Produção de rebentos (número de rebentos m^{-2} semana $^{-1}$) ao longo das semanas do ano de 2010, nos Viveiros do Furadouro.

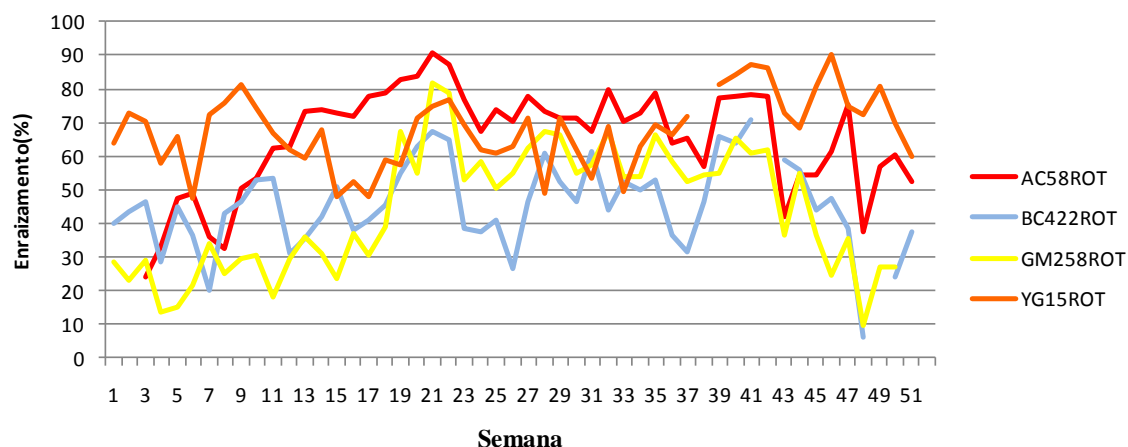


Figura 3.4 - Percentagem de enraizamento das estacas (% enraizamento semana $^{-1}$) ao longo das semanas do ano de 2010, nos Viveiros do Furadouro.

3.2.3.- Recolha dos dados

Os dados climáticos referem-se ao período de 1 de Dezembro de 2009 e 31 de Janeiro de 2011 e os dados de produção e enraizamento, ao período de 4 de Janeiro a 31 de Dezembro de 2010. A escolha destes períodos de tempo teve por objectivo a análise de um ano completo de dados, para uma maior consistência das conclusões e, ainda, para observar a existência ou não de sazonalidade na produção e enraizamento das estacas.

Os dados foram agrupados por períodos de uma semana e a caracterização climática de cada semana de produção, incluiu as seguintes variáveis:

- Temperatura
 - Média (MedT), °C
 - Máxima (MaxT), °C
 - Mínima (MinT), °C
 - Média diurna (MedTDia), °C
 - Média nocturna (MedTNoite), °C
 - Diferença entre temperatura diurna e nocturna (DifT), °C
 - Número de horas inferior a 16°C (Tx16), h
 - Número de horas entre 16°C e inferiores a 19°C (T16x19), h
 - Número de horas entre 19°C e inferiores a 22°C (T19x22), h
 - Número de horas entre 22°C e inferiores a 25°C (T22x25), h
 - Número de horas iguais ou superiores a 25°C (Tx25), h
- Humidade relativa
 - Média (MedHR), %
 - Máxima (MaxHR), %
 - Mínima (MinHR), %
 - Média diurna (MedHRDia), %
 - Média nocturna (MedHRNoite), %
 - Diferença entre temperatura diurna e nocturna (DifHR), %
 - Número de horas inferior a 60% (HRx60), h
 - Número de horas entre 60% e inferiores a 70% (HR60x70), h
 - Número de horas entre 70% e inferiores a 80% (HR70x80), h
 - Número de horas entre 80% e inferiores a 90% (HR80x90), h
 - Número de horas iguais ou superiores a 90% (HRx90), h
- DPV (kPa)
 - Média (MedDPV), kPa
 - Máxima (MaxDPV), kPa
 - Mínima (MinDPV), kPa
 - Média diurna (MedDPVDia), kPa

- Média nocturna (MedDPVNoite), kPa
- Diferença entre DPV diurno e nocturno (DifDPV), kPa
- Número de horas inferior a 0,35 kPa (DPVx0350), h
- Número de horas entre 0,35 kPa e inferiores a 0,5 kPa (DPV035x050), kPa
- Número de horas entre 0,5 kPa e inferiores a 0,65 kPa (DPV050x065), kPa
- Número de horas entre 0,65 kPa e inferiores a 0,8 kPa (DPV065x080), kPa
- Número de horas iguais ou superiores a 0,8 kPa (DPVx080), Kpa
- Número de horas diurnas (NHDia), h
- Número horas nocturnas (NHNoite), h
- Radiação solar
 - Acumulada (SumRad), W m^{-2}
 - Global (RadGlob), $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$
 - Média (RadMed), W m^{-2} ; (RadPARMed), $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
 - Máxima (RadMax), W m^{-2} ; (RadPARMax), $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
- Estação do ano (EstacaoAno)

A caracterização climática, de cada semana de enraizamento, tem as seguintes variáveis:

- Temperatura
 - Média (MedT), °C
 - Máxima (MaxT), °C
 - Mínima (MinT), °C
 - Média diurna (MedTDia), °C
 - Média nocturna (MedTNoite), °C
 - Diferença entre temperatura diurna e nocturna (DifT), °C
 - Número de horas inferior a 19°C (Tx19), h
 - Número de horas entre 19°C e inferiores a 21 °C (T19x21), h
 - Número de horas entre 21°C e inferiores a 23 °C (T21x23), h
 - Número de horas entre 23°C e inferiores a 25 °C (T23x25), h
 - Número de horas iguais ou superiores a 25°C (Tx25), h
- Humidade relativa
 - Média (MedHR), %
 - Máxima (MaxHR), %

- Mínima (MinHR), %
- Média diurna (MedHRDia), %
- Média nocturna (MedHRNoite), %
- Diferença entre temperatura diurna e nocturna (DifHR), %
- Número de horas inferior a 80% (HRx80), h
- Número de horas entre 80% e inferiores a 85% (HR80x85), h
- Número de horas entre 85% e inferiores a 90% (HR85x90), h
- Número de horas entre 90% e inferiores a 95% (HR90x95), h
- Número de horas iguais ou superiores a 95% (HRx95), h
- *DPV*
 - Média (MedDPV), kPa
 - Máxima (MaxDPV), kPa
 - Mínima (MinDPV), kPa
 - Média diurna (MedDPVDia), kPa
 - Média nocturna (MedDPVNoite), kPa
 - Diferença entre DPV diurno e nocturno (DifDPV), kPa
 - Número de horas inferior a 0,2 kPa (NHDPVx020), h
 - Número de horas entre 0,2 kPa e inferiores a 0,3 kPa (NHDPV020x030), h
 - Número de horas entre 0,3 kPa e inferiores a 0,4 kPa (NHDPV030x040), h
 - Número de horas entre 0,4 kPa e inferiores a 0,5 kPa (NHDPV040x050), h
 - Número de horas iguais ou superiores a 0,5 kPa (NHDPVx050), h
- Número de horas diurnas (NHDia), h
- Número horas nocturnas (NHNoite), h
- Radiação solar
 - Acumulada (SumRad), W m^{-2}
 - Global (RadGlob), $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$
 - Média (RadMed), W m^{-2} ; (RadPARMed), $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
 - Máxima (RadMax), W m^{-2} ; (RadPARMax), $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
- Estação do ano (EstacaoAno)

Os dados de produtividade do parque de pés-mãe (rebentos $\text{m}^{-2} \text{semana}^{-1}$) foram medidos pelo número de rebentos colocados a enraizar, ou seja, a produção líquida. Considerou-se que as pessoas que efectuaram a colheita dos rebentos eram todas experientes e que todas as miniestacas colocadas a enraizar cumpriam os critérios de qualidade já referidos. Salienta-se que a qualidade das miniestacas em enraizamento foi sendo verificada ao longo do processo, pelas operadoras e pelos responsáveis da empresa pela propagação vegetativa.

Para a avaliação da produtividade de miniestacas dos pés-mãe, foram consideradas as características climáticas que se verificaram durante a semana de preparação das miniestacas, semana ([0]) e durante cada uma das três semanas anteriores ([−1], [−2], [−3]). Para além destes quatro períodos, foram também analisados os resultados de produtividade, em função dos seguintes períodos de tempo: semana [0] e semana anterior ([0,−1]); semana [0] e duas semanas anteriores ([0,−1, −2]) e, ainda, semana [0] e três semanas anteriores ([0,−1, −2, −3]).

O enraizamento (% semana^{-1}) foi avaliado pela percentagem de estacas que enraizaram entre as 7 e 9 semanas após a sua colocação no substrato de enraizamento. No entanto, à quarta semana após o início do enraizamento, existia um grande número de raízes visíveis na base do contentor, sendo este período de quatro semanas o que assumiu maior influência na emissão de primórdios radiculares e consequentemente no enraizamento final obtido. Deste modo, a caracterização climática para o enraizamento foi efectuada considerando a semana de colocação no enraizamento, semana ([0]) e cada uma das três semanas seguintes ([+1], [+2] e [+3]). Para além destes quatro períodos, foram também analisados os resultados do enraizamento, em função dos seguintes períodos de tempo: semana [0] e seguinte ([0,+1]); semana [0] e duas seguintes ([0,+1, +2]) e semana [0] e três seguintes ([0,+1, +2, +3]).

Esta metodologia permitiu avaliar a produção de rebentos e o enraizamento em função das condições ambientais de 4 semanas (aproximadamente 1 mês), tal como foi efectuado por Scarassati (2003) e Cunha et al. (2009) que utilizaram dados médios mensais, assim como permitiu avaliar em função das condições verificadas nas primeiras semanas, que têm maior influência.

3.2.3 - Análise de dados

Os resultados foram analisados através da análise de componentes principais, utilizando o software SPSS® V15.0 e, posteriormente, por análise de regressão, com o software Microsoft® Excel®, para algumas das variáveis climáticas.

A análise de componentes principais é uma metodologia estatística multivariada que permite transformar um conjunto de variáveis iniciais correlacionadas entre si, noutro conjunto com menor número de variáveis não correlacionadas, que resultam de combinações lineares das variáveis iniciais, reduzindo a complexidade da interpretação dos resultados (Brito, 1996).

Em muitas situações é difícil encontrar o significado das componentes como variáveis compostas, pelo que, essencialmente, esta técnica permite a redução da dimensão do número de variáveis, como passo prévio à aplicação de outras análises posteriores, como por exemplo um diagrama de dispersão para as primeiras componentes, com o objectivo de encontrar conjuntos de dados (“clusters”) que permitem encontrar diferenças ou semelhanças entre as variáveis (Villardón, 2006). Para além da redução da dimensão do número de variáveis, retendo o máximo possível da informação original, esta técnica pode também ser utilizada para compreender a estrutura das variáveis ou construir questionários para medir variáveis não mensuráveis por outros métodos (Field, 2005).

A primeira parte do processo de extracção de factores consiste na determinação das relações lineares com as variáveis escolhidas, pelo cálculo dos autovalores. Os autovalores representam a quantidade da variância explicada por cada componente principal. Valores superiores a um representam uma variância substancial extraída por essa componente (Field, 2005). A cada componente principal também está associada a percentagem de variância explicada, devendo a primeira componente explicar a maior parte da percentagem da variância e as seguintes, explicar apenas uma pequena percentagem desta variância. Sabendo que existem tantas componentes como variáveis, e que a maior parte da variância deve de ser explicada pelas primeiras componentes, a análise e a redução do número de variáveis foram efectuadas pela percentagem de variância explicada pelas duas principais componentes.

A relação entre as variáveis e as componentes principais pode também ser verificada pela importância do factor que é carregado por variável em cada componente. Idealmente, uma variável deveria ter um factor alto numa componente e valores relativamente baixos nas outras componentes. De um modo geral, consideram-se válidos os valores absolutos superiores a 0,3. Como a significância depende do tamanho da amostra, Stevens (1992) citado por (Field, 2005), resume que, para uma amostra com cinquenta unidades (número de amostragens recolhidas), se tiverem sido carregados valores acima de 0,722 são considerados significantes e para uma amostragem de cem unidades devem ter valores carregados superiores a 0,512.

A primeira abordagem à totalidade dos dados foi a selecção da semana ou conjunto de semanas que maior variância explicava, para a produção de rebentos e para o enraizamento. Após a selecção da semana, foram eliminadas as variáveis que, de uma forma geral, menor variância explicavam. Como a redução do número de variáveis pode prejudicar a análise e a qualidade dos resultados, foi utilizado o factor de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO), para a medição da adequação das variáveis e da amostragem utilizada. Valores de KMO inferiores a 0,5 são inaceitáveis (deve-se recolher mais dados ou repensar nas variáveis a incluir), de 0,5-0,6 a adequação é má, de 0,6-0,7 é razoável, de 0,7-0,8 é média, de 0,8-0,9 é boa e de 0,9-1,0 é muito boa (Brito, 2006).

Depois de realizada a selecção das variáveis mais explicativas de cada processo, foram realizadas análises de regressão de forma a verificar e medir o efeito de cada variável, na produção de rebentos e na percentagem de enraizamento.

3.3.1 - Influência das condições climáticas da estufa de pés-mãe

Os dados climáticos da estufa onde se encontram os pés-mãe podem influenciar, para além da produtividade dos rebentos, o seu enraizamento. Assim, apresenta-se em seguida a relação entre os dados climáticos da estufa dos pés-mãe e a produção de rebentos e ainda a relação destes dados climáticos e o enraizamento.

3.3.1.1 - Influência na produção de rebentos

Após o cálculo das médias dos dados climáticos por semana e/ou por agrupamento de semanas, efectuou-se uma análise de componentes principais (ACP) para verificar previamente, qual a semana ou qual o agrupamento de semanas que melhor explicava a produção de rebentos. A caracterização climática de cada semana foi efectuada para as 44 variáveis descritas no ponto 3.2.3, e os resultados da produtividade de rebentos dos 4 clones em análise, foram organizados de acordo com as semanas em que se realizaram as respectivas colheitas dos rebentos. Como os dados foram agrupados em 7 conjuntos: semana de preparação das estacas [0], cada uma das três semanas anteriores [-1], [-2] e [-3], semana 0 e semana anterior [0, -1], semana 0 e duas semanas anteriores [0, -1, -2] e semana 0 e três semanas anteriores [0, -1, -2, -3], chega-se a um total de trezentas e treze variáveis em análise, sendo trezentas e oito variáveis climáticas, independentes e cinco variáveis dependentes que são referentes aos dados de produção de rebentos e o número da semana onde foram produzidos.

Uma prévia análise de componentes principais (ACP) demonstrou que as duas primeiras componentes tinham autovalores muito elevados e superiores às outras componentes, o que indicou uma grande percentagem da variância explicada por essas componentes. O elevado autovalor (fig. 3.5) das primeiras componentes, indicou a existência de uma grande percentagem de variância extraída pela primeira (50,7%) e pela segunda (12,3%) componente, o que confirmou a retenção dos dois primeiros factores, recaindo sobre estes a explicação da produção de rebentos, em função dos dados climáticos dos pés-mãe. A explicação dos resultados apenas utilizando duas componentes, torna mais compreensível a interpretação dos resultados, dado que as relações entre as variáveis são directas ou indirectas. Este facto levou a que se seleccionasse o somatório das variâncias das duas primeiras componentes, para a selecção da semana ou grupo de semanas que melhor

caracterizavam a produção de rebentos. Quanto maior a variância explicada, maior é a relação existe entre as variáveis, logo, melhor se consegue explicar a produção de rebentos em função dos dados climáticos da estufa dos pés-mãe.

Na figura 3.5 encontra-se o gráfico de sedimentação dos autovalores de cada componente, onde se pode verificar que as duas primeiras componentes têm autovalores muito superiores às restantes componentes e, assim, a percentagem da variância é explicada por essas duas componentes principais, com todas as variáveis agrupadas em função da semana. Com base nesta variância explicada pelas duas primeiras componentes principais, verificou-se qual o agrupamento de variáveis (“semanas”) que melhor explicava a produção de rebentos. Embora a variância entre os agrupamentos de variáveis tenha variado entre 67,9 e 72,8% (fig.3.6), pode-se concluir que o agrupamento dos dados da semana de produção e das três semanas anteriores ([0, -1, -2, -3]) teve uma maior extracção, com 72,8% da variância retida em duas componentes. De acordo com estes resultados, recaíram sobre este conjunto de dados, médias das quatro semanas, as análises que posteriormente se apresentam.

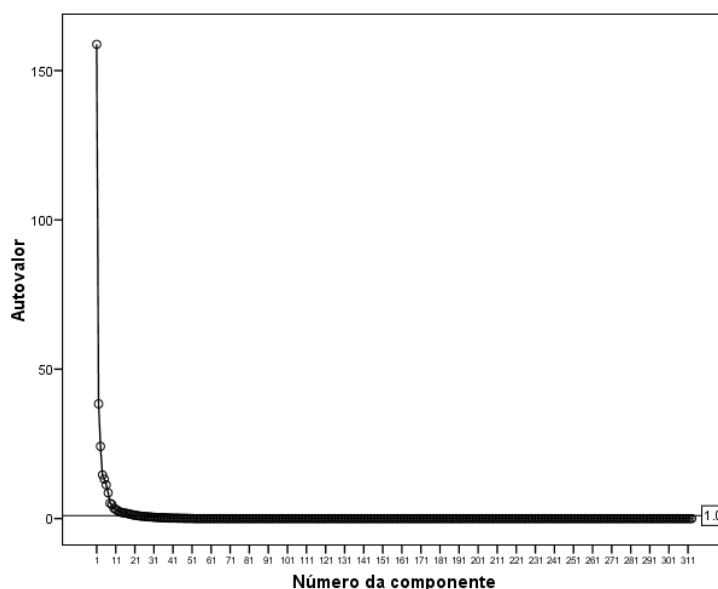


Figura 3.5 - Sedimentação das componentes principais da relação entre os dados climáticos da estufa dos pés-mãe e o seu efeito na produção de rebentos.

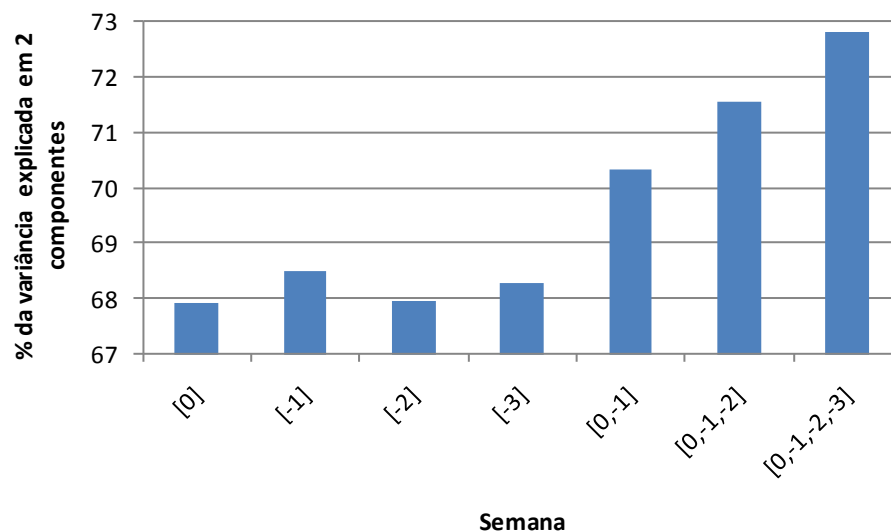


Figura 3.6 - Extracção da variância explicada em duas componentes, para a avaliação do efeito dos dados climáticos da zona de pés-mãe na produtividade de rebentos, sendo [0] a semana de preparação dos rebentos, [-1] a semana anterior, [-2] a segunda semana anterior, [-3] a terceira semana anterior, [0, -1] a média da semana de preparação dos rebentos e semana anterior, [0, -1, -2] a média da semana de preparação dos rebentos e das duas semanas anteriores e [0, -1,-2,-3] a média da semana de preparação dos rebentos e das três semanas anteriores.

Através da análise do gráfico de sedimentação (fig. 3.7) do total de variáveis que caracterizavam o conjunto de dados médios das quatro semanas, verificou-se, uma vez mais, que as duas primeiras componentes foram as que tinham maior autovalor, logo as que explicavam a maior parte da variância.

Na figura 3.8 verifica-se a elevada dispersão de variáveis em função das duas componentes principais, demonstrando mais uma vez a dificuldade da explicação sobre o processo de produção de rebentos e sobre qual o parâmetro que maior influencia teve na produção de rebentos.

Através da visualização da dispersão das variáveis pelas duas componentes principais e dos seus factores carregados em cada componente (Anexo 2), foi possível elaborar as relações entre as componentes.

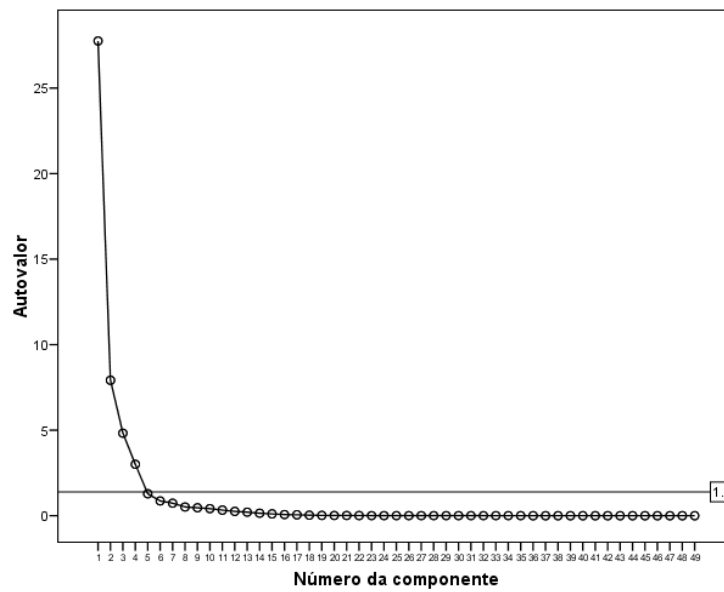


Figura 3.7 - Sedimentação das componentes dos dados médios das 4 semanas ([0,-1,-2,-3]).

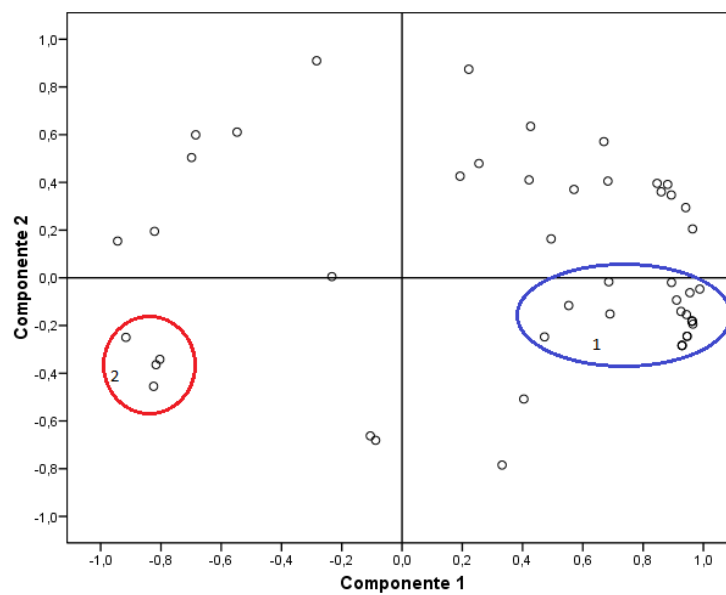


Figura 3.8 - Representação gráfica das componentes principais para as variáveis analisadas para o agrupamento das quatro semanas de produção. Na elipse 1 encontram-se representados as variáveis bem representadas na componente 1 com acção directa e no elipse 2 as variáveis bem representadas na componente 1 mas de acção indirecta.

Assim, por exemplo, as variáveis de produção de rebentos (PRO) dos quatro clones em estudo (AC58, BC422, GM258 e YG15) estão representadas na primeira componente, com

uma relação directa (elipse 1 da figura 3.8) com as variáveis de temperatura média (MedT), *DPV* médio (MedDPV) e radiação média (MedRad). Estas variáveis climáticas estão significativamente representadas nesta componente e, por terem relação directa, indicam que quanto maior forem os valores observados nestas variáveis, maior será a produtividade de rebentos. Ainda que bem representadas na primeira componente, mas com uma relação indirecta (elipse 2 da figura 3.8) temos, por exemplo, as variáveis que medem o número de horas com temperaturas inferiores a 19°C (Tx16 e T16x19) e com o número de horas com humidade relativa entre 70 e 80% (HR70x80). Neste caso, como as variáveis de produção estão todas relacionadas com a primeira componente, apresentam uma grande independência das variáveis da segunda componente, mesmo que estejam bem representadas, como a humidade relativa média (MedHR). Pode-se assim dizer, que a produção de rebentos é independente dos valores médios de humidade relativa média recolhidos neste trabalho.

A análise efectuada indicou que a avaliação da produtividade de rebentos pelos quatro clones em estudo pode ser realizada com os dados médios das variáveis de temperatura (MedT, °C), do *DPV* (MedDPV, kPa), da radiação média diária (RadMed, W m⁻²) e do número de horas com humidade relativa entre 70 e 80% (HR70x80). Seleccionadas as variáveis climáticas, foram verificadas as variâncias explicadas pelas duas componentes principais e, como o número de variáveis estava bastante reduzido, utilizou-se também o coeficiente de adequação (KMO). Este agrupamento de quatro variáveis climáticas extraiu um pouco mais (75,9%) da variância explicada, em comparação com o conjunto total de 49 variáveis que foram utilizadas para a caracterização do conjunto de variáveis climáticas médios das 4 semanas (72,8%). O coeficiente de adequação foi bom (KMO = 0,835), o que permitiu continuar com a análise.

Partindo de 75,9 % da variância retida nas duas primeira componentes e uma adequação boa entre os dados e as variáveis (KMO de 0,835), foram testados os efeitos isolados de cada variável climática, ou agrupamentos de duas variáveis, com o objectivo de, através de uma forma mais simplificada, ser possível explicar a maior variância possível. O quadro 3.1 apresenta o resumo da variância extraída em duas componentes para os quatro clones, em função das variáveis climáticas, verificando-se que nenhuma das variáveis extraiu maior variância de forma isolada do que a sua totalidade. No entanto, pela observação da

figura 3.9 verificou-se que os clones AC58 e GM258 apresentam uma maior aproximação com as variáveis climáticas *DPV* médio (MedDPV) e radiação média (RadMed). Desta forma, foi verificada a relação entre estes dois clones e as variáveis climáticas (quadro 3.2).

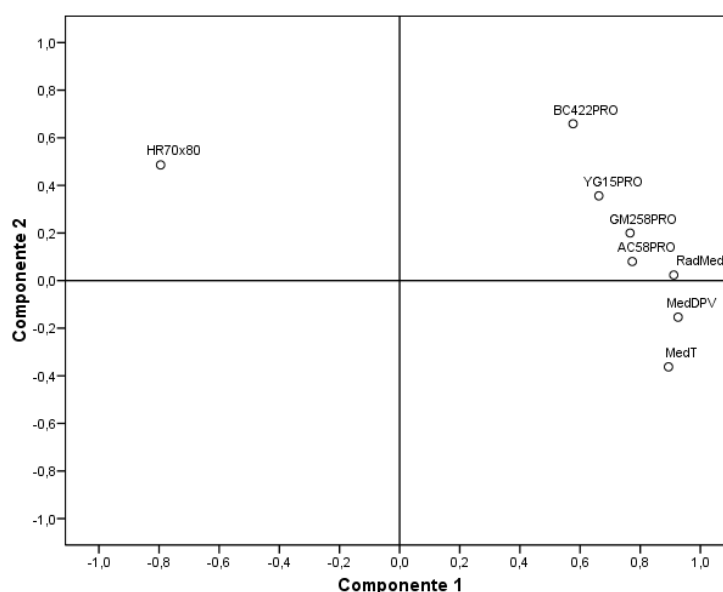


Figura 3.9 - Representação gráfica da relação entre as 4 variáveis climáticas, temperatura média (MedT), *DPV* médio (MedDPV), média radiação (RadMed) e número de horas com humidade relativa entre 70 e 80% (HR70x80), e a produção (PRO) dos quatro materiais vegetais testados, AC58, BC422, GM258 e YG15.

Quadro 3.1 - Variância extraída pelas 2 componentes principais para a produção dos quatro materiais vegetativos em estudo (B KMO boa (0,8 a 0,9); C KMO média (0,7 a 0,8

	Temperatura (MedT)	DPV Médio (MedDPV)	Radiação Média (RadMed)	Horas de HR entre 70 e 80% (HR70x80)
Temperatura (MedT)	72,782 ^B	74,382 ^B	73,395 ^B	74,726 ^C
DPV Médio (MedDPV)	74,382 ^B	73,339 ^B	75,060 ^B	72,882 ^B
Radiação Média (RadMed)	73,395 ^B	75,060 ^B	73,852 ^B	72,384 ^B
Horas de HR entre 70 e 80% (HR70x80)	74,726 ^C	72,882 ^B	72,384 ^B	72,418 ^C

Com os dois clones AC58 e GM258a variância extraída aumentou para aproximadamente 84,1% para as variáveis *DPV* e radiação solar. A adequação entre os dados em estudo foi

boa (KMO entre 0,8 a 0,9), o que sugeriu a existência de uma elevada relação entre estas variáveis climáticas e os dados de produção de rebentos. Atendendo a estes resultados, foi efectuada uma análise de regressão (fig 3.10) para medir o efeito real destas variáveis, e analisar que variância era retida, de forma isolada, com cada clone.

Quadro 3.2 - Variância extraída pelas 2 componentes principais para a produção de estacas dos clones AC57 e GM258 (B KMO boa (0,8 a 0,9); C KMO média (0,7 a 0,8); D KMO razoável (0,6 a 0,7)).

	Temperatura (MedT)	DPV Médio (MedDPV)	Radiação Média (RadMed)	Horas de HR entre 70 e 80% (HR70x80)
Temperatura (MedT)	87,460 ^C	85,637 ^C	84,381 ^B	86,445 ^D
DPV Médio (MedDPV)	85,637 ^C	89,461 ^C	87,745 ^C	83,514 ^C
Radiação Média (RadMed)	84,381 ^B	87,745 ^C	89,730 ^C	82,429 ^C
Horas de HR entre 70 e 80% (HR70x80)	86,445 ^D	83,514 ^C	82,429 ^C	86,258 ^D

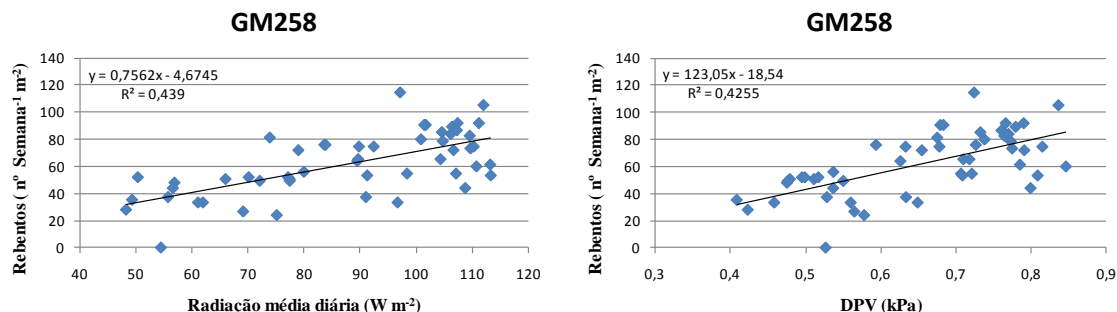


Figura 3.10 - Efeito da radiação solar média diária e DPV na produção de rebentos de GM258.

Da análise dos valores de regressão obtidos, verificou-se que a produção de rebentos dependeu da radiação solar ($P < 0,001$) e do *DPV* ($P < 0,001$). No entanto, cada uma destas variáveis, isoladamente, apenas conseguiu explicar 42 a 44% da variabilidade da produção de rebentos.

Considerando que as regressões que representam a produção de rebentos do clone GM258 são lineares, pode-se concluir que, dentro dos valores observados, quanto maior for o *DPV*

médio ou a radiação solar média, maior será a sua produção de rebentos. Foi também testado o efeito simultâneo das duas variáveis, que se pode expressar pela seguinte equação: $y = -69,832 + 68,929 (\text{MedDPV}) + 1,758 (\text{RadMed}) - 0,008 (\text{RadMed})^2$. Esta equação apenas explica aproximadamente 46% da variabilidade da produção de rebentos ($R^2=0,463$), mas indica que a radiação solar média com valores muito elevados pode ter um efeito negativo sobre a produção de rebentos do clone GM258.

No caso do clone AC58 (fig 3.11) verificou-se que a produção de rebentos dependeu ($P < 0,01$) da radiação solar e do *DPV*, podendo-se afirmar que a radiação solar explicou aproximadamente 47% da variabilidade dos resultados de produção através da seguinte equação: $y = -0,0177x^2 + 3,6455x - 119,3$. O *DPV*, por sua vez, explicou 44% da variabilidade dos resultados de produção para este clone, através da seguinte equação: $y = -341,95x^2 + 549,41x - 150,9$.

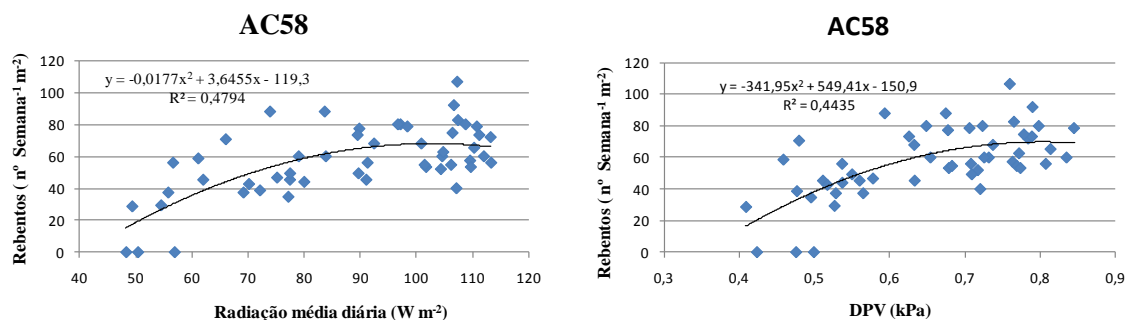


Figura 3.11 - Efeito da radiação solar média diária e *DPV* na produção de rebentos de AC58.

Embora não sendo considerada nas quatro variáveis climáticas principais, foi efectuada a regressão para o efeito da radiação global para ambos os clones (fig. 3.12). A radiação global mede a acumulação de energia ao longo do dia estando, assim, relacionada com a radiação solar média, influenciando também a produção de rebentos ($P < 0,001$). Com a radiação solar global conseguiu-se explicar aproximadamente 50% da variabilidade da produção de rebentos de GM258, através da equação: $y = -3,0824x^2 + 34,913x - 22,179$. Para o clone AC58, apenas se conseguiu explicar aproximadamente 47% da variabilidade da produção de rebentos.

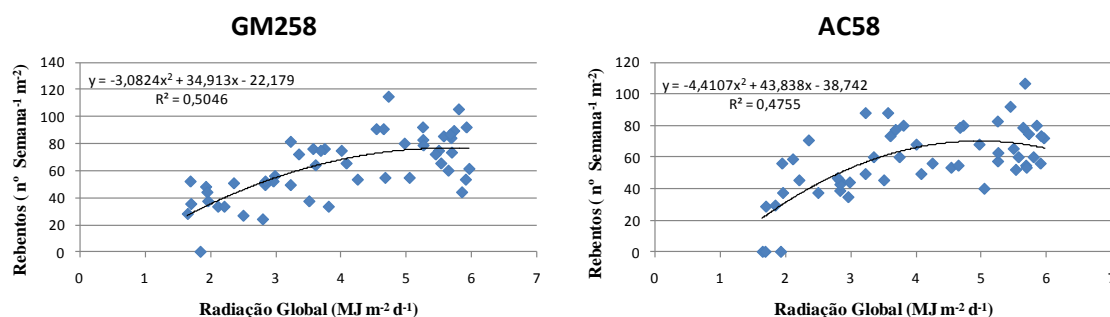


Figura 3.12 - Efeito da radiação global média diária na produção de rebentos de AC58 e GM258.

O maior afastamento das variáveis climáticas, por parte dos clones BC422 e YG15, verificou-se pela menor variância extraída (82,7%) e por uma menor adaptação das variáveis média (KMO de 0,7 a 0,8). No quadro 3.3 apresentam-se as variâncias extraídas pelas duas primeiras componentes. A regressão efectuada entre a produção de rebentos destes clones e a radiação solar média diária foi significativa ($P < 0,001$) para qualquer um destes clones. No entanto, as regressões obtidas explicam muito pouco, aproximadamente 30%, dos resultados obtidos para a produtividade dos rebentos em função da radiação média diária.

Quadro 3.3 - Variância extraída pelas 2 componentes principais para a produção estacas dos clones BC422 e YG15 (^C KMO média (0,7 a 0,8); ^D KMO razoável (0,6 a 0,7); ^E KMO má (0,5 a 0,16)).

	Temperatura (MedT)	DPV Médio (MedDPV)	Radiação Média (RadMed)	Horas de HR entre 70 e 80% (HR70x80)
Temperatura (MedT)	82,621 ^D	83,084 ^D	81,475 ^C	84,201 ^E
DPV Médio (MedDPV)	83,084 ^D	83,446 ^D	84,545 ^D	80,581 ^D
Radiação Média (RadMed)	81,475 ^C	84,545 ^D	86,243 ^D	79,817 ^D
Horas de HR entre 70 e 80% (HR70x80)	84,201 ^E	80,581 ^D	79,817 ^D	82,865 ^E

Pela análise da figura 3.13, verificou-se que BC422 atinge o máximo de produtividade com uma radiação de 107,7 W m² resolução da equação $y = -0,001x^2 + 2,1561x - 56,756$. Para o

clone YG15, dentro dos valores observados, pode-se dizer-se que quanto maior for a radiação maior é a produtividade de rebentos.

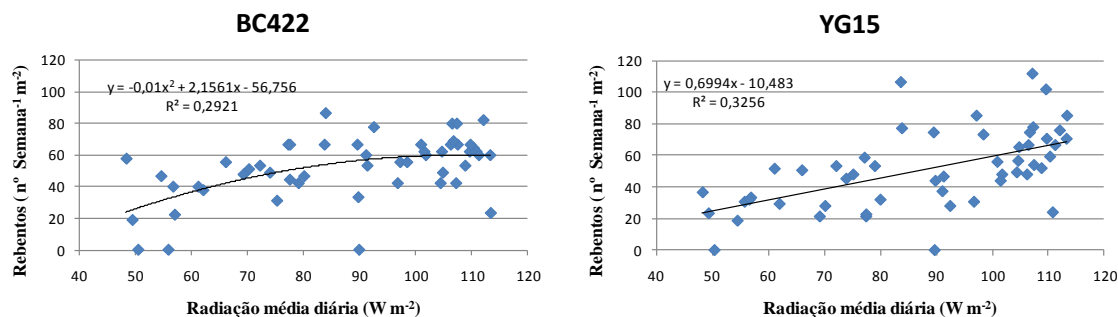


Figura 3.13 - Efeito da radiação solar média diária na produção de rebentos de BC422 e YG15.

Foi realizada também a verificação da influência da radiação global para os clones BC422 e YG15. Na figura 3.14 pode-se ver que a produção de rebentos dos clones BC422 e YG15 dependeu ($P < 0,001$) da radiação global média, mas só se conseguiu explicar um pouco mais de 30% da variabilidade dos resultados pela resolução das respectivas equações de regressão.

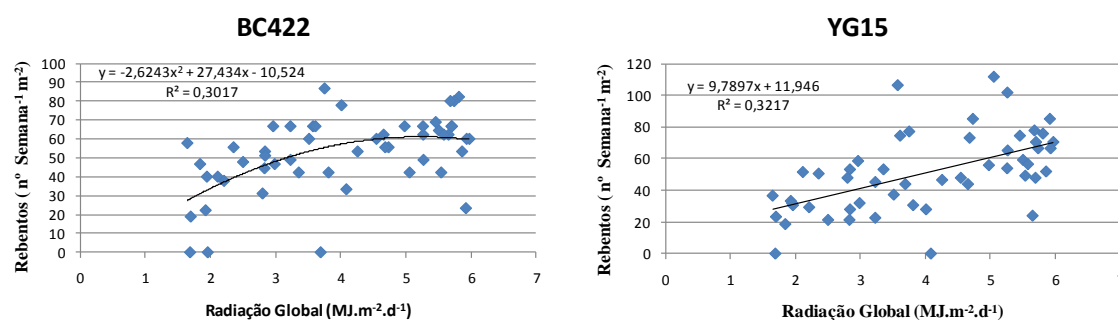


Figura 3.14 - Efeito da radiação solar global na produção de rebentos de BC422 e YG15.

3.3.1.2 – Influências climáticas no enraizamento dos rebentos

Analisaram-se, neste ponto, a influência das condições climáticas no compartimento dos pés-mãe, no processo de enraizamento dos rebentos vegetativos. Os dados climáticos

considerados são os mesmos que foram utilizados para a avaliação dos efeitos climáticos na produtividade de rebentos, sendo agora relacionados com os resultados de enraizamento dos mesmos como miniestacas.

Através da análise de componentes principais (fig. 3.15), verificou-se que a influência das condições climáticas da estufa dos pés-mãe foi muito forte nas duas primeiras componentes, pelo facto de terem autovalores muito elevados, com variâncias altas, sendo 49,1% da variância explicada pela primeira componente e 14,4% pela segunda componente. De acordo com estes dados, e através da variância máxima explicada em duas componentes, procedeu-se à verificação do conjunto de variáveis climáticas do parque de pés-mãe, agrupadas por semana, ou conjunto de semanas, que maior influência teve no enraizamento (fig. 3.16).

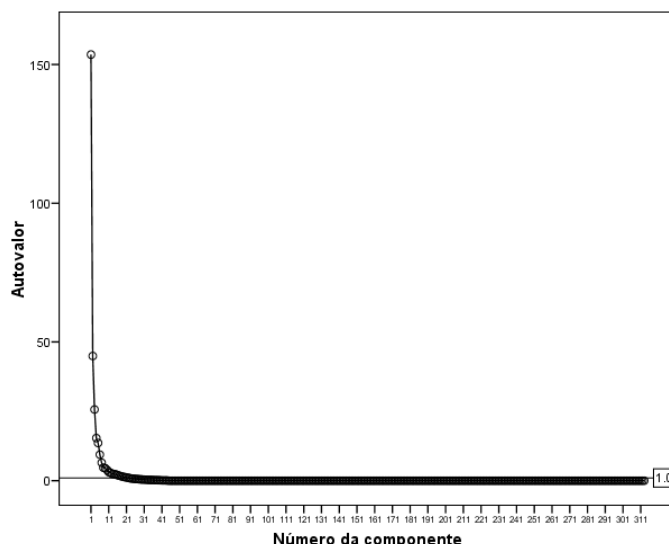


Figura 3.15 - Sedimentação das componentes principais da relação entre os dados climáticos da estufa dos pés-mãe e o seu efeito no enraizamento dos rebentos.

Os dados médios das 4 semanas ([0, -1, -2, -3]), foi o agrupamento de variáveis climáticas que maior variância extraiu em duas componentes (74,2%), sendo sobre estas variáveis que incidiram as análises que posteriormente se apresentam.

Após a primeira análise, e agrupamento de variáveis climáticas (“semana”) que melhor explicou o processo de enraizamento, efectuou-se a análise do gráfico de sedimentação (fig.3.17), agora apenas com as variáveis climáticas referentes aos dados médios das 4

semanas ([0, -1, -2, -3]) e os resultados de enraizamento dos clones AC58, BC422, GM258 e YG15. Tal como ocorreu para a selecção da semana, verificou-se também que as duas primeiras componentes tinham autovalores elevados, sendo extraído 55,5% da variância na primeira componente e 18,6% na segunda componente.

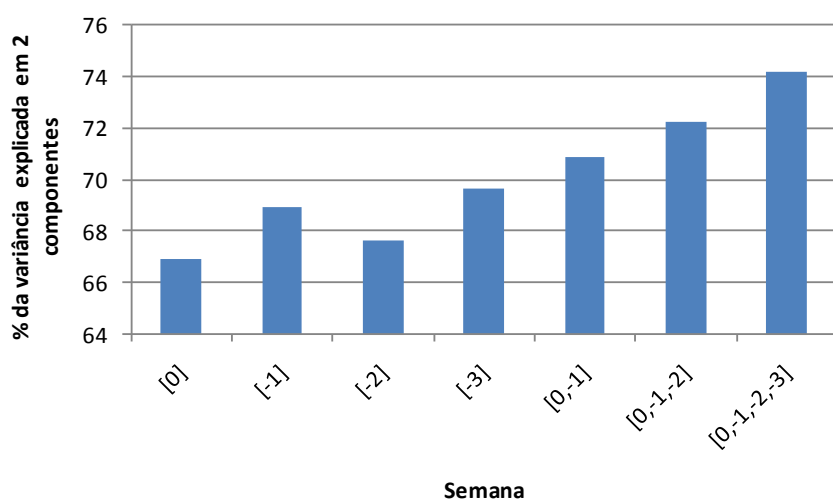


Figura 3.16 - Extracção da variância explicada em duas componentes, para a avaliação do efeito dos dados climáticos da zona de pés-mãe no enraizamento, sendo [0] a semana de preparação dos rebentos, [-1] a semana anterior, [-2] duas semanas anteriores, [-3] três semanas anteriores, [0,-1] a média da semana de preparação dos rebentos e semana anterior, [0, -1, -2] a média da semana de preparação dos rebentos as duas semanas anteriores e [0,-1,-2,-3] a média da semana de preparação dos rebentos e as três semanas anteriores.

Com o elevado número de variáveis climáticas verificadas é difícil explicar qual a variável ou conjunto de variáveis que maior influência tiveram no enraizamento. Assim, a partir da figura 3.18 com a representação gráfica das duas primeiras componentes, verificou-se que existiam muitas variáveis que não estavam relacionadas.

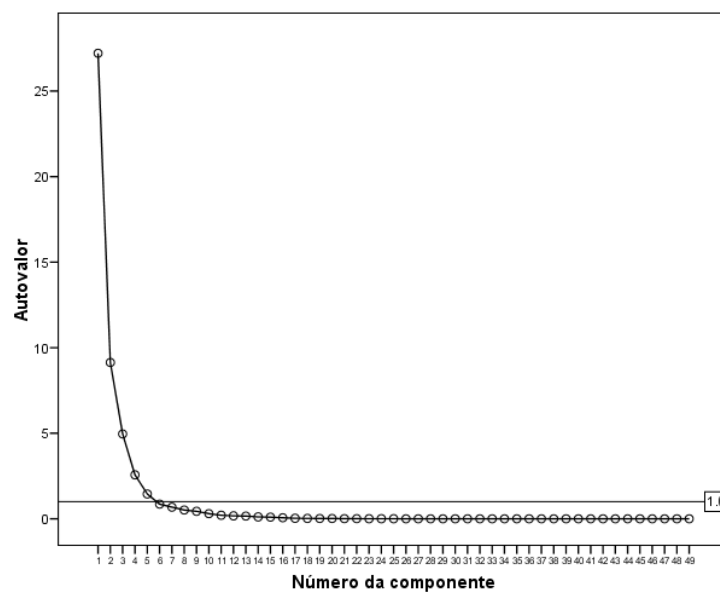


Figura 3.17 - Sedimentação das componentes principais da relação dos dados climáticos da estufa dos pés-mãe médios das 4 semanas ([0,-1,-2,-3]) e o seu efeito no enraizamento.

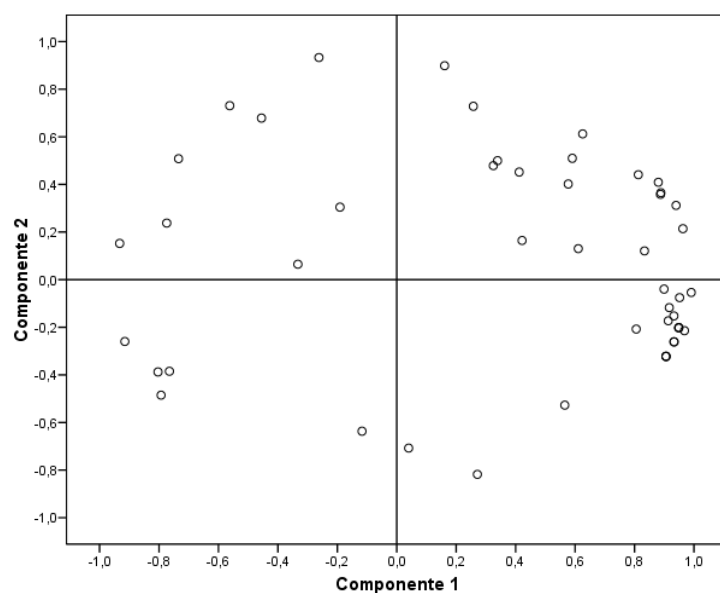


Figura 3.18 - Representação gráfica das componentes principais das variáveis analisadas para os valores médios de 4 semanas dos dados climáticos de produção no enraizamento.

No anexo 3 encontram-se os factores que cada variável carrega em cada componente, e que estão representadas graficamente na figura 3.18. Por exemplo, verificou-se que os clones AC58 e GM258 estão representados de forma significativa na primeira componente, tal

como o BC422, mas de forma não significativa (menos bem representado). Desta forma, identificou-se que os clones que estão bem representados na primeira componente estão bastante relacionados, e de forma directa, com as variáveis climáticas de temperatura média (MedT), *DPV* médio (MedDPV) e radiação solar média (RadMed). Salienta-se que as variáveis relacionadas directamente com o enraizamento, indicaram que quanto maior fosse o seu valor maior seria o resultado do enraizamento. No entanto, as variáveis que contabilizam o número de horas com temperaturas abaixo dos 19°C, temperatura de 16 a 19°C (T16x19) e temperaturas abaixo dos 16°C (Tx16), estão também representadas significativamente na primeira componente, mas com efeito indirecto. Assim, quanto maior for o seu valor (maior número de horas nestas condições), menor será a percentagem de enraizamento.

Por outro lado, o clone YG15 ainda com um factor que tem de ser considerado ($> 0,3$), não se representou de uma forma significativa e estava relacionado com a segunda componente. Este clone apresentou uma grande independência das variáveis climáticas de temperatura média (MedT), *DPV* médio (MedDPV) e radiação solar média (RadMed) e com acção directa com a variável de humidade relativa média (MedHR), que está significativamente representada na segunda componente.

Com esta análise, foi possível restringir as variáveis climáticas para as seguintes quatro variáveis: temperatura média (MedT), *DPV* médio (MedDPV), radiação solar média (RadMed) e humidade relativa média (MedHR), que estão melhor representadas nas duas primeiras componentes e que, por outro lado, podem ser facilmente programáveis na estufa para que se consiga a maximização do enraizamento de estacas.

Com estas quatro variáveis climáticas e com os resultados de enraizamento dos quatro clones, foi novamente efectuada uma análise de componentes principais para verificar qual a variância no enraizamento explicada por estas variáveis climáticas e se existia alguma variável, ou conjunto de duas variáveis, que explicassem melhor o enraizamento (fig. 3.19). Verificou-se que estas variáveis conseguiam explicar 76,3% da variância do enraizamento em duas componentes e com uma adequação aceitável mas má ($KMO = 0,595$).

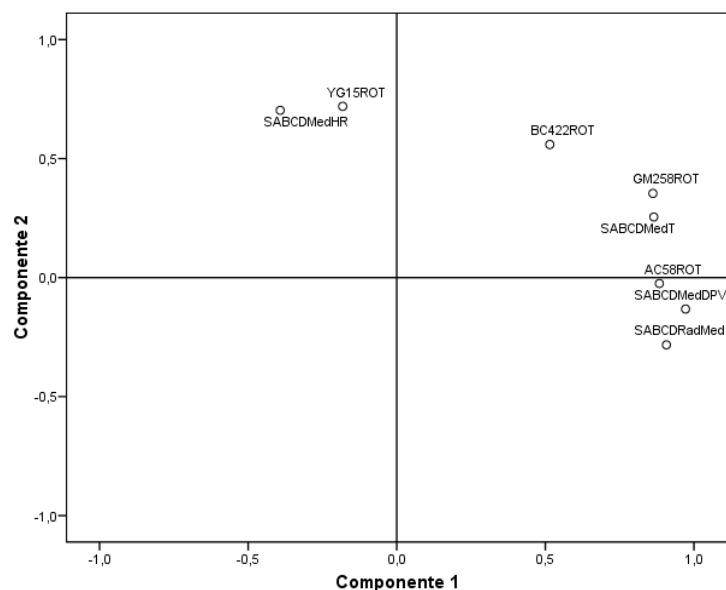


Figura 3.19 - Representação gráfica da relação entre as 4 variáveis climáticas, temperatura média (MedT), *DPV* médio (MedDPV), média radiação (RadMed) e humidade relativa média, e o enraizamento (ROT) dos quatro materiais vegetais testados, AC58, BC422, GM258 e YG15.

Considerando a percentagem de variância explicada nas duas primeiras componentes e a adequação dos dados ao pretendido, foi verificada qual a variável ou agrupamento de duas variáveis que maior influência tinham no enraizamento, tal como se resume no quadro 3.4. Os valores apresentados neste quadro, indicam que não existem variâncias com valores muito distintos do inicial e a adequação dos dados, embora aceitável, vai de média a má, não permitindo objectivar sobre qual a variável climática do compartimento dos pés-mãe que maior influência teve no enraizamento dos quatro clones em estudo.

Quadro 3.4 - Variância extraída pelas 2 componentes principais para estudar o efeito das condições climáticas da produção no enraizamento das estacas dos quatro clones (^C KMO média (0,7 a 0,8); ^D KMO razoável (0,6 a 0,7); ^E KMO má (0,5 a 0,6)).

	Temperatura (MedT)	Humidade Relativa (MedHR)	DPV (MedDPV)	Radiação (RadMed)
Temperatura (MedT)	79,207 ^C	71,707 ^E	80,736 ^C	79,469 ^C
Humidade Relativa (MedHR)	71,707 ^E	72,905 ^E	75,037 ^D	74,066 ^D
DPV (MedDPV)	80,736 ^C	75,037 ^D	81,307 ^D	82,137 ^C
Radiação (RadMed)	79,469 ^C	74,066 ^D	82,137 ^C	80,38 ^D

Considerando a figura 3.19, verificou-se que os clones AC58 e GM258 estavam mais próximos de algumas variáveis climáticas que os clones BC422 e YG15, sendo efectuada novamente a análise das variáveis climáticas, mas agora com os materiais agrupados em função da resposta.

No quadro 3.5 encontram-se as variâncias extraídas pelas duas primeiras componentes e o valor do coeficiente de adequação entre os dados. Partindo de 89,9% da variância explicada pelas duas primeiras componentes e com uma adequação razoável (KMO = 0,672) verificou-se que a temperatura média e o DPV médio, de forma isolada, conseguiam extrair mais de 94% da variância explicada em duas componentes, com um coeficiente de adequação médio. No entanto, não foi possível distinguir, efectivamente, qual dos factores era mais explicativo.

Quadro 3.5 - Variância extraída pelas 2 componentes principais para estudar o efeito das condições climáticas da produção no enraizamento dos clones AC58 e GM258 (^C KMO média (0,7 a 0,8); ^D KMO razoável (0,6 a 0,7); ^E KMO má (0,7 a 0,8)).

	Temperatura (MedT)	Humidade Relativa (MedHR)	DPV (MedDPV)	Radiação (RadMed)
Temperatura (MedT)	94,483 ^C	91,419 ^E	92,667 ^C	88,386 ^C
Humidade Relativa (MedHR)	91,419 ^E	93,347 ^F	91,664 ^D	88,331 ^E
DPV (MedDPV)	92,667 ^C	91,664 ^D	94,776 ^C	91,357 ^C
Radiação (RadMed)	88,386 ^C	88,331 ^E	91,357 ^C	90,295 ^C

Terminada a análise de componentes principais e reduzida a amostra, foi realizada uma análise de regressão para a temperatura média e para DPV médio e o seu efeito no enraizamento dos clones AC58 e GM258 (fig. 3.20 e 3.21).

Pela análise dos dados da figura 3.20, conclui-se que o enraizamento dependeu ($P < 0,001$) da temperatura média podendo determinar-se mais de 60% dos resultados de enraizamento do clone AC58 pela resolução da expressão $y = -1,8404x^2 + 78,722x - 765,47$ e para o clone GM258 mais de 68% da variabilidade do enraizamento pode ser determinada pela equação $y = 6,5291x - 87,933$.

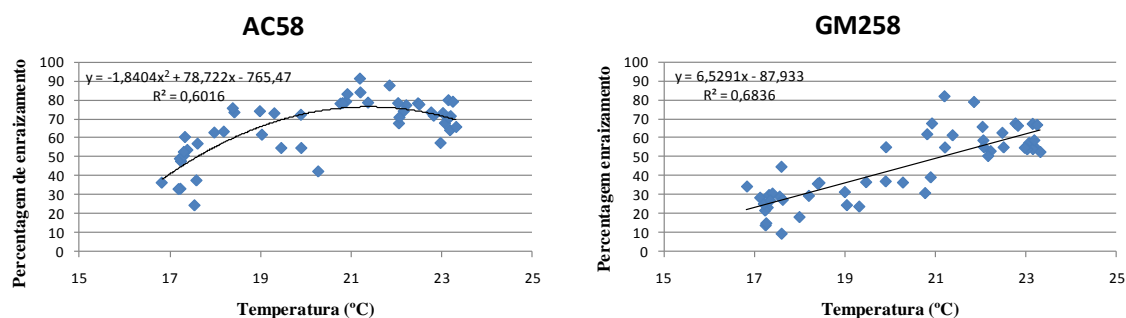


Figura 3.20 - Efeito da temperatura média na produção de rebentos de AC58 e GM258.

Da regressão obtida para o efeito do DPV médio da estufa dos pés-mãe, verificou-se que o enraizamento dependeu do DPV ($P < 0,001$), conseguindo-se explicar mais de 68% da variabilidade do enraizamento para o clone AC578 e aproximadamente 60% da variabilidade para o GM258.

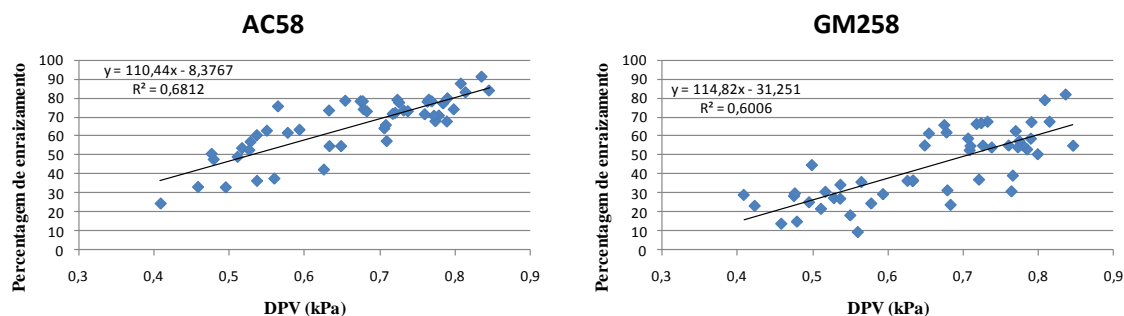


Figura 3.21 - Efeito do DPV na produção de rebentos de AC58 e GM258.

A análise de componentes principais com as mesmas variáveis climáticas mas agora com os clones BC422 e YG15, extraiu menos variância do que quando analisadas em conjunto os quatro clones e as quatro variáveis climáticas. Para além da menor variância explicada (76,1%) pelas duas principais componentes, o coeficiente de adequação (KMO) foi inaceitável, o que indicou que não existiam dados suficientes ou as variáveis não eram adequadas para o objectivo do estudo.

3.3.2 - Resultados da estufa de enraizamento

Pretendeu-se neste ponto analisar a influência das condições climáticas na estufa de enraizamento, na percentagem de enraizamento (ROT) dos quatro clones em estudo (AC58, BC422, GM258 e YG15). Os dados climáticos foram agrupados de um modo semelhante ao indicado nos pontos 3.3.1.1 e 3.3.1.2, assim como a metodologia referida nestes pontos.

Na figura 3.22 verifica-se que as duas primeiras componentes principais têm autovalores muito superiores às outras componentes, explicando-se desta forma 52,2% da variância na primeira componente e 14,6% da variância na segunda componente. Atendendo a este facto, mais uma vez, verificou-se a percentagem da variância que é retida pelas duas componentes principais para as semanas apresentadas de forma isolada ou agrupada.

Na figura 3.23 sobressai a variância extraída (76,1%) pelos dados relativos à semana de preparação e às três semanas seguintes ([0, +1, +2, +3]). Estes resultados demonstram e justificam a existência de uma programação climática comum para estas 4 semanas. É também sobre estes dados climáticos que se efectuaram os testes posteriores.

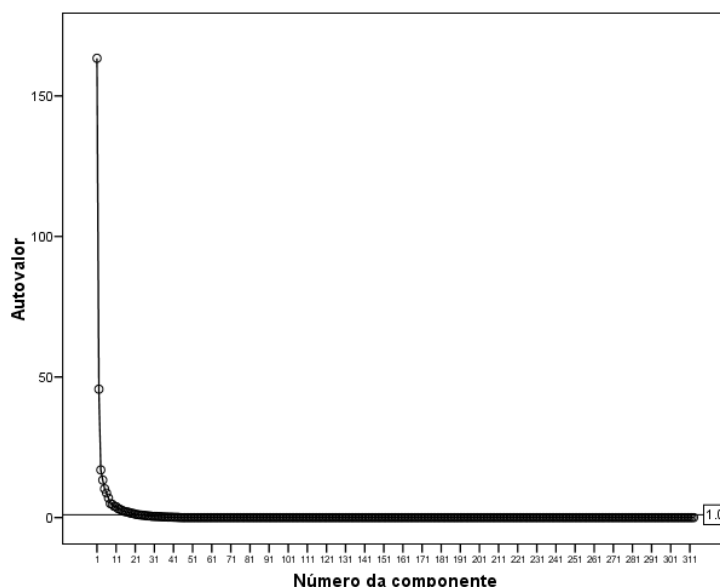


Figura 3.22 - Sedimentação das componentes variáveis da relação dos dados climáticos da estufa de enraizamento e o seu efeito no enraizamento dos rebentos.

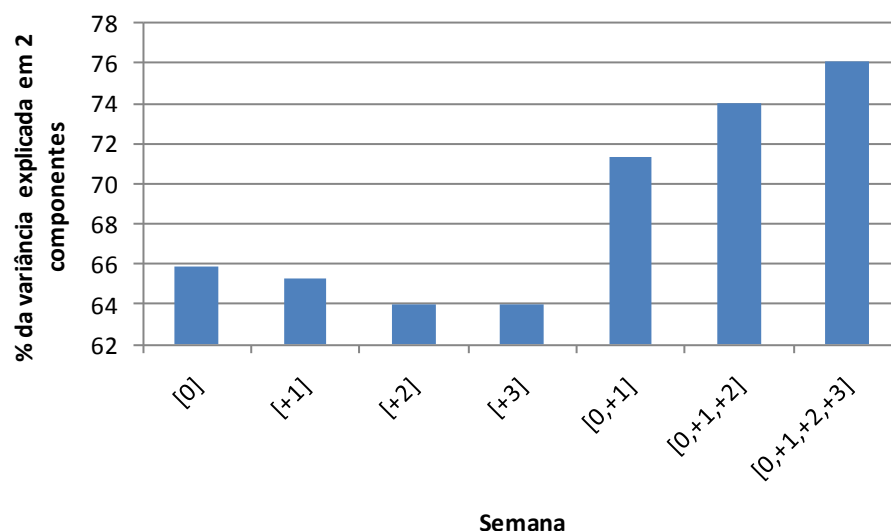


Figura 3.23 - Extracção da percentagem da variância explicada em duas componentes em função da semana para os dados de enraizamento, sendo a semana de preparação dos rebentos [0], a semana seguinte [+1], as segunda semana seguintes [+2], a terceira semana seguinte [+3], a média da semana de preparação dos rebentos e semana seguinte [0,+1], a média da semana de preparação dos rebentos as duas semanas seguintes [0,+1, +2] e a média da semana de preparação dos rebentos e as três semanas seguintes [0,+1,+2,+3].

Seleccionado o período que melhor caracterizou o processo de enraizamento, efectuou-se novamente a análise de componentes principais com vista à redução do número de variáveis, sem diminuição da variância total explicada. Mais uma vez verificou-se que é nas duas primeiras componentes que se extrai a maior parte da variância (fig. 3.24), sendo extraída 59,1% da variância na primeira componente e 16,9% da variância pela segunda componente. No entanto a existência de inúmeras variáveis climáticas dificultaram a análise sobre quais foram as variáveis que tiveram maior influência no enraizamento, tal como se verifica na figura 3.25, que representa a dispersão das variáveis em estudo em função dos factores carregados por cada componente. No anexo 4 encontram-se os valores carregados por cada variável nas duas primeiras componentes.

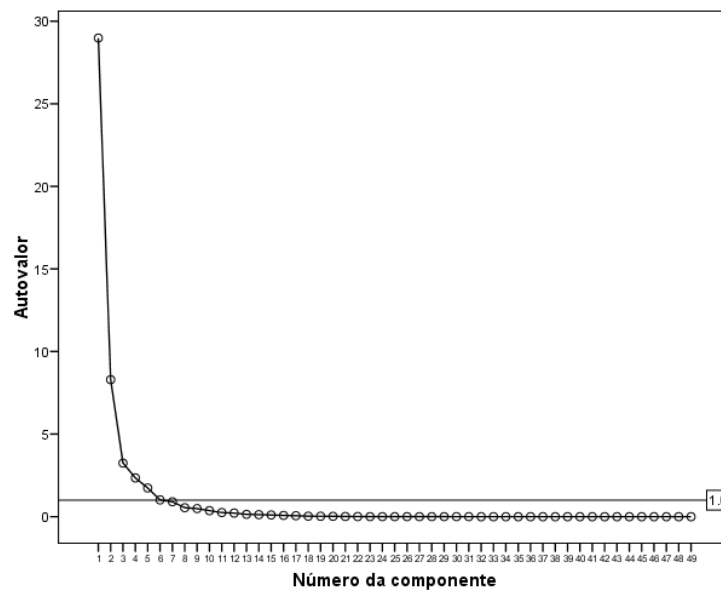


Figura 3.24 - Sedimentação das componentes principais dos dados climáticos, da estufa de enraizamento, médios das quatro semanas [0,+1,+2,+3] e o seu efeito no enraizamento.

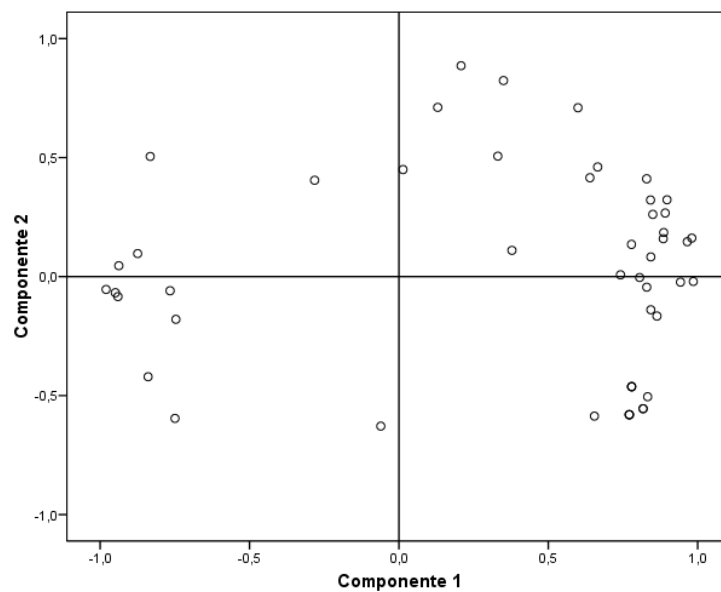


Figura 3.25 - Representação gráfica das componentes principais para as variáveis analisadas para o agrupamento das quatro semanas de enraizamento.

Analisando a matriz de componentes (anexo 4) verificou-se numericamente os factores que cada variável carrega em cada componente, e que estão representadas graficamente na figura 3.25. Por exemplo, pela matriz de componentes pode-se visualizar que o enraizamento (ROT) dos clones AC58 e GM258 estão significativamente representados com a primeira componente e, embora ainda que relacionado com a primeira componente, o enraizamento do clone BC422 não está muito bem representado (não significativo). A primeira componente está muito bem representada com as variáveis de temperatura média (MedT) e humidade relativa média (MedHR), com efeito directo, logo quanto maior for o valor destas variáveis maior será o enraizamento. Por outro lado, o enraizamento destes clones estava relacionado inversamente com variáveis como o *DPV* médio (MedDPV) e com o número de horas com humidade relativa inferior a 85% (número de horas com humidade relativa inferior a 80% (HRx80) e humidades entre 80 e 85% (HR80x85). As variáveis inversamente relacionadas indicam que quanto maior for o seu valor menor será o enraizamento destes materiais.

O clone YG15, embora não significativamente, estava relacionado com a segunda componente, logo apresenta uma grande independência quanto às variáveis temperatura média (MedT, °C), humidade relativa média (MedHR, %), e com o *DPV* médio (MedDPV, kPa). Esta segunda componente está muito bem relacionada com o número da semana e com a estação do ano, com acção directa e com relação inversa com variáveis como a radiação média (RadMed, W m²) e o número de horas em que o *DPV* superior a 0,5 kPa (DPVx050).

A eliminação de variáveis climáticas em função dos valores mais significativamente relacionados com o enraizamento, conduziu a que nas análises seguintes se tenha considerado apenas as variáveis médias de temperatura, humidade relativa, *DPV* e radiação solar. Do ponto de vista prático, são também estas as variáveis programáveis neste compartimento. Analisando os quatro clones e estas quatro variáveis ambientais (fig. 3.26) conseguiu-se extrair 78,9% da variância retida em duas componentes, e o coeficiente de adequação da amostra foi razoável (KMO= 0,680). Efectuando uma verificação da variância retida por cada variável de forma isolada, ou as conjugações de duas variáveis, verificou-se que analisando os quatro clones não existiu nenhuma variável que conseguisse extrair maior variância (quadro 3.6).

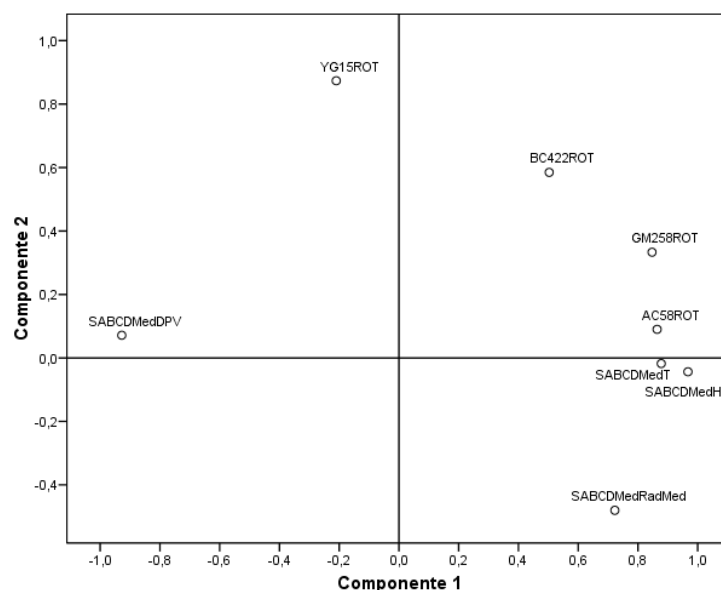


Figura 3.26 - Representação gráfica da relação entre as 4 variáveis climáticas, temperatura média (MedT), DPV médio (MedDPV), média radiação (RadMed) e humidade relativa média (MedHR), e o enraizamento (ROT) dos quatro materiais vegetais testados, AC58, BC422, GM258 e YG15.

Quadro 3.6 - Variância extraída pelas duas primeiras componentes principais para o enraizamento dos quatro materiais vegetativos em estudo (^C KMO média(0,7 a 0,8); ^D KMO razoável (0,6 a 0,7)).

	Temperatura (MedT)	Humidade Relativa (MedHR)	DPV (MedDPV)	Radiação (RadMed)
Temperatura (MedT)	78,684 ^D	80,304 ^C	78,462 ^C	76,845 ^D
Humidade Relativa (MedHR)	80,304 ^C	80,519 ^C	81,402 ^C	79,156
DPV (MedDPV)	78,462 ^C	81,402 ^C	79,513 ^C	78,543 ^C
Radiação (RadMed)	76,845 ^D	79,156 ^C	78,543 ^C	79,159 ^D

Pela observação do gráfico de componentes principais (fig. 3.26), verificou-se que os clones AC58 e GM258 estão mais relacionados com as variáveis climáticas em análise, do que os outros dois clones em estudo. Este facto levou à necessidade de efectuar a mesma abordagem realizada para a totalidade de variáveis, mas agora considerando um grupo que

agregasse os valores de enraizamento dos clones AC58 (AC58ROT) e GM258 (GM258ROT), e qual a interacção destes dois clones com as variáveis climáticas.

A variância retida em duas componentes quando se analisaram os clones AC58 e GM258 e as quatro variáveis climáticas foi de 86,4% e com uma adequação da amostra razoável (KMO =0,684). Efectuando os testes às variáveis de forma isolada (quadro 3.7) verificou-se que, para estes dois clones, a temperatura explicou mais de 93% da variância do enraizamento, apenas pela temperatura média das 4 semanas de enraizamento.

Quadro 3.7 - Variância extraída pelas 2 componentes principais para o enraizamento do clone AC57 e GM258 (C KMO média (0,7 a 0,8); D KMO razoável (0,6 a 0,7)).

	Temperatura (MedT)	Humidade Relativa (MedHR)	DPV (MedDPV)	Radiação (RadMed)
Temperatura (MedT)	93,388 ^C	91,965 ^D	89,288 ^C	85,989 ^C
Humidade Relativa (MedHR)	91,965 ^D	93,149 ^C	92,288 ^D	88,400 ^C
DPV (MedDPV)	89,288 ^C	92,288 ^D	92,238 ^C	87,405 ^C
Radiação (RadMed)	85,989 ^C	88,400 ^C	87,405 ^C	90,506 ^D

Dada a elevada variância extraída em duas componentes pelos clones AC58 e GM258, foram realizadas análises de regressão com a temperatura, concluindo-se que o enraizamento (y) do AC58 e GM258 dependeu da temperatura (x) ($P < 0,001$). No caso do clone AC58, mais de 49% da variabilidade do enraizamento foi explicada pela regressão quadrática $y = -2,3957x^2 + 112,55x - 1247$, e para o GM258 mais de 67% da variabilidade do enraizamento foi explicada pela regressão quadrática $y = -1,5035x^2 + 75,777x - 892,68$ (fig. 3.27).

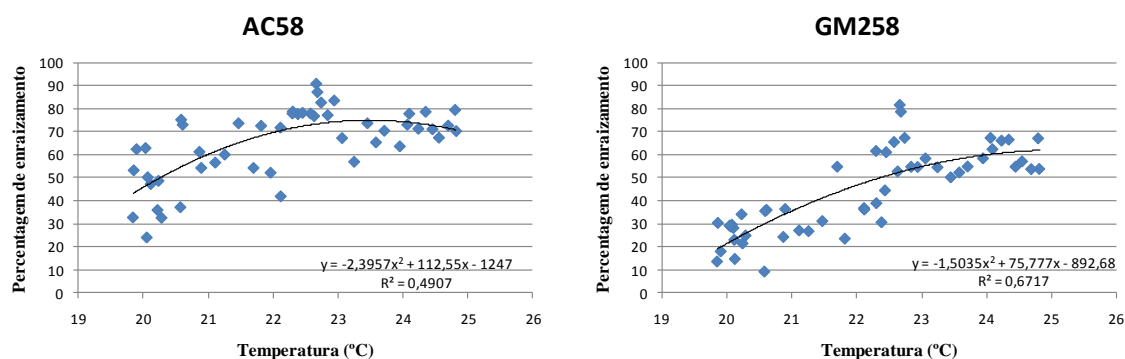


Figura 3.27 - Efeito da temperatura no enraizamento dos clones AC58 e GM228.

No outro grupo dos clones BC422 e YG15, ainda que tenham um maior afastamento das variáveis climáticas, foram efectuadas as mesmas análises de componentes principais com as variáveis climáticas, que estão resumidos no quadro 3.8. Foi extraída cerca de 80,256% da variância explicada pelas duas primeiras componentes mas com adequação má. Quando analisadas de forma isolada ou em grupos de duas variáveis destaca-se que a adequação da amostra de má a inaceitável, indicando que ou a amostra é pequena, ou a escolha das variáveis não foi a mais adequada.

Quadro 3.8 - Variância extraída pelas 2 componentes principais para o enraizamento do clone BC422 e YG15 (^E KMO má (0,5 a 0,6); ^F KMO inaceitável (< 0,5)).

	Temperatura (MedT)	Humidade Relativa (MedHR)	DPV (MedDPV)	Radiação (RadMed)
Temperatura (MedT)	83,272 ^F	83,449 ^E	80,418 ^E	77,407 ^E
Humidade Relativa (MedHR)	83,449 ^E	84,167 ^F	84,963 ^E	80,858 ^E
DPV (MedDPV)	80,418 ^E	84,963 ^E	83,609 ^F	81,125 ^E
Radiação (RadMed)	77,407 ^E	80,858 ^E	81,125 ^E	85,432 ^F

No entanto, como exercício, foi efectuada a análise de regressão do efeito da temperatura, uma das variáveis explicativas do enraizamento dos clones AC58 e GM258, para os clones BC422 e YG15 (fig.3.28), tendo-se concluído que o enraizamento do clone BC422 foi influenciado pela temperatura ($P < 0,05$) mas que apenas 13% da variabilidade da amostra

dependeu da seguinte equação quadrática: $y = -0,881x^2 + 41,764x - 445,01$. O enraizamento do clone YG15 não dependeu da temperatura ($P > 0,05$).

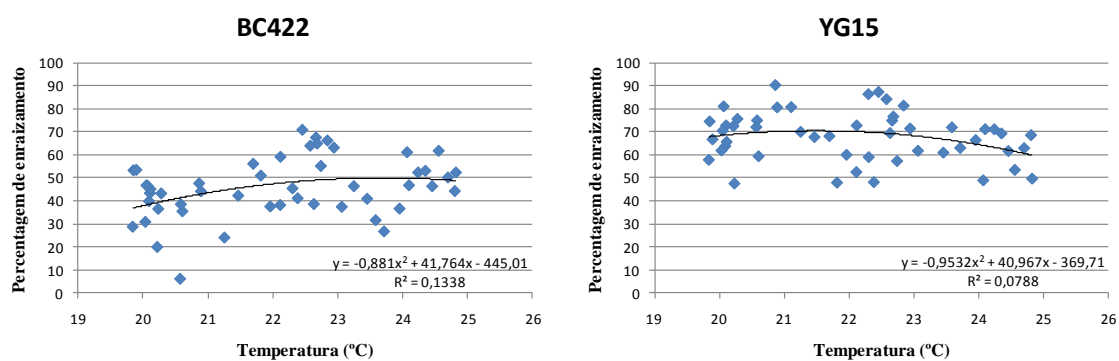


Figura 3.28 - Efeito da temperatura no enraizamento do BC422 e YG15.

3.4.-Conclusões

A produção de rebentos e o enraizamento de miniestacas de *Eucalyptus globulus* Labill. são processos que dependem largamente das condições ambientais a que foram sujeitos, nomeadamente, das condições climáticas que se registaram nas quatro semanas anteriores à preparação de rebentos, e nas quatro semanas seguintes à colocação dos rebentos a enraizar. No entanto, os clones AC58 e GM258 apresentam maior dependência das condições ambientais, sendo por isso fortemente influenciados, positiva ou negativamente, por essas condições, enquanto os clones BC422 e YG15 apresentaram uma menor dependência.

As condições climáticas verificadas na estufa de pés-mãe influenciaram a produtividade de rebentos, principalmente os valores médios da temperatura do ar, do défice da pressão de vapor (*DPV*), da radiação solar e do número de horas com humidade relativa entre 70 e 80%. Destas variáveis, a radiação solar e o *DPV*, foram as mais explicativas da produção de rebentos para os clones AC58 e GM258. Para o clone AC58, a produção máxima obtida foi de 70,2 rebentos m^{-2} semana⁻¹ com uma radiação solar global diária de 5,0 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ e, com *DPV* de 0,80 kPa, a produção máxima foi de 69,8 rebentos m^{-2} semana⁻¹. O clone GM258 atingiu a produtividade de 76,7 rebentos m^{-2} semana⁻¹ com radiação solar global de 5,7 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ e, para o valor do *DPV* de 0,85 kPa, a produtividade alcançada foi de 80,7 rebentos m^{-2} semana⁻¹. Os clones BC422 e YG15, ainda que sejam significativamente afectados pelas condições ambientais, apresentaram coeficientes de determinação baixos nas regressões entre a produtividade e as condições ambientais. Ainda assim, durante o ensaio, o clone BC422 atinge um máximo de 60,7 rebentos m^{-2} semana⁻¹ com uma radiação solar global média de 5,2 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ e o clone YG15 apresentou uma produção máxima de 70,4 rebentos m^{-2} semana⁻¹ com valores de 6,0 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$.

As condições climáticas, nomeadamente os valores médios diários da temperatura e do *DPV*, verificadas na estufa de pés-mãe durante o crescimento dos rebentos que posteriormente foram colocados na estufa de enraizamento, também influenciaram o processo de enraizamento. No entanto, uma vez mais, este efeito verificou-se apenas para os clones AC58 e GM258, tendo-se obtido um enraizamento máximo de 76,3% com valores de temperatura média de 21,4°C para o clone AC58 e de 64,2% com 23,9°C para o

clone GM258. Para os clones BC422 e YG15 verificou-se que os dados obtidos durante o ensaio não foram suficientes para verificar o efeito das condições ambientais.

As condições climáticas da estufa de enraizamento influenciaram o sucesso do enraizamento dos clones AC58 e GM258, tendo-se obtido para o primeiro clone 74,9% de enraizamento com uma temperatura de 23,5°C e, para o segundo, a percentagem máxima de enraizamento obtida foi de 62,1%, alcançada com uma temperatura média de 25,2°C. O clone BC422, ainda que seja significativamente afectados pela temperatura média ($P < 0,05$), apresentou coeficientes de determinação baixos nas regressões, sendo obtidos enraizamentos de 49,9% a uma temperatura média de 23,7°C. Para o clone YG15 não foi evidente a influência das condições ambientais na percentagem de enraizamento, sendo obtidas percentagens de enraizamento de 47,5 a 90,4% para o intervalo de temperaturas de 19,8 a 24,8°C.

O conhecimento das condições favoráveis para a produção de rebentos e para o enraizamento de *Eucalyptus globulus* Labill. permite a maximização dos resultados em cada fase do processo, contribuindo para o cumprimento dos objectivos da empresa. Através da metodologia utilizada, este trabalho contribuiu também para a criação de uma base de trabalho que permite avaliar as condições ambientais que influenciam directamente a produção de rebentos no parque de pés-mãe e o processo de enraizamento para diferentes genótipos.

4.- CONCLUSÕES FINAIS

A realização do presente trabalho, com duas partes bastante distintas mas complementares, permitiu encontrar as melhores condições ambientais para a maximização da produção de rebentos no parque de pés-mãe e na fase de enraizamento de miniestacas de *Eucalyptus globulus* Labill., bem como a definição de vários cenários de gestão ambiental para estas produções.

A metodologia utilizada neste trabalho para a concepção dos modelos climáticos, baseada em balanços de energia e de massa, combinou o cálculo físico com a determinação estatística de coeficientes, métodos que tradicionalmente têm sido utilizados de forma independente por diversos autores. Esta metodologia abre uma nova possibilidade para a modelação climática em estufas de produção, que possuam diversos equipamentos de controlo ambiental necessários a essa produção. Esta situação difere dos modelos desenvolvidos com dados obtidos em estufas experimentais destinadas exclusivamente a projectos de investigação, onde se testam os equipamentos de forma independente. Foram ainda propostos e validados dois modelos, o modelo de aquecimento e o modelo de arrefecimento, obtendo-se diferenças absolutas entre os valores de temperatura e de humidade relativa medidos e simulados, respectivamente, de 0,98 e 1,31°C e de 6,78 e 7,46%.

Os modelos climáticos desenvolvidos permitem também a previsão dos valores climáticos no interior da estufa, simulando diferentes estratégias de controlo e funcionamento dos equipamentos. Permitem ainda verificar o correcto dimensionamento dos equipamentos, adequar as estratégias de programação e determinar os custos energéticos associados a cada estratégia.

O conhecimento das condições favoráveis para a produção de rebentos e para o enraizamento permite a maximização dos resultados em cada fase do processo, contribuindo para o cumprimento dos objectivos da empresa. Através da realização de uma análise multivariada por análise de componentes principais, concluiu-se que existe uma grande dependência da propagação vegetativa de *Eucalyptus globulus* Labill. com as condições ambientais, embora de forma diferenciada para a produção de rebentos e para o enraizamento e para os diferentes clones que se estudaram. Os clones AC58 e GM258 são

materiais genéticos que estão mais dependentes das condições ambientais, sendo por isso fortemente influenciados, positiva ou negativamente, por essas condições enquanto os clones BC422 e YG15, embora aparentemente relacionados com as condições ambientais, apresentaram uma menor dependência das condições ambientais.

As condições ambientais verificadas na estufa de pés-mãe, nomeadamente a radiação solar global diária e o défice de pressão de vapor (*DPV*), no período de quatro semanas que antecederam a colheita, tiveram uma forte incidência na produtividade de rebentos para obtenção de miniestacas. Valores de radiação global de 5,0 e 5,7 MJ m⁻² d⁻¹ e *DPV* de 0,80 e 0,85 kPa foram as condições que resultaram na maior produtividade de rebentos pelos clones AC58 e GM258, que variou entre 70,0 e 81,0 rebentos m⁻² semana⁻¹. Para além da influência sobre a produção de rebentos o *DPV* que ocorreu na estufa de pés-mãe também influenciou o posterior enraizamento das miniestacas que foram colocadas na zona de enraizamento.

As condições ambientais que ocorreram nas quatro semanas após a colheita dos rebentos para enraizar, também influenciaram a percentagem de enraizamento obtida, nomeadamente a temperatura média do ar, cujo valor óptimo foi de 23,5°C para o clone AC58 (74,9%) e de 25,2°C para o GM258 (62,1%).

Este trabalho contribuiu ainda para a criação de uma base de trabalho que permite avaliar as condições ambientais que influenciam directamente a produção de rebentos e o enraizamento, para diferentes genótipos.

A interacção entre o conhecimento das condições favoráveis aos processos de produção de rebentos e de enraizamento de miniestacas e a possibilidade de prever as condições climáticas no interior das estufas, resulta, por exemplo, na possibilidade de testar e simular diferentes estratégias de programação dos equipamentos para que se consigam atingir os objectivos pretendidos e definir diferentes algoritmos de controlo. Esta interacção permite, ainda, realizar estudos de rendabilidade para cada processo produtivo, ou seja, qual o valor objectivo que permite a máxima produtividade com o menor consumo de energia.

RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES PARA O FUTURO

No futuro poderão ainda vir a ser desenvolvidos os seguintes estudos:

- Desenvolver estudos que permitissem conceber um modelo único que consiga simular as condições climáticas durante todo o ano e não um modelo para o Inverno e outro para o Verão.
- Estudar de forma mais exaustiva os resultados obtidos com as variáveis climáticas, de modo a objectivar com maior precisão as condições ideais para a produção dos clones em estudo ou de outros clones que se venham a desenvolver.
- Utilizar os modelos desenvolvidos para simular as condições ideais dentro da estufa e simular os objectivos a programar em cada equipamento com base nos algoritmos discutidos nesta tese.
- Automatizar os modelos e testar diferentes algoritmos de controlo para a melhoria da estratégia de funcionamento dos equipamentos. A criação e validação de novos algoritmos de controlo terão uma implicação directa no cumprimento dos objectivos de programação dos equipamentos e na qualidade final do controlo ambiental da estufa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdel-Ghany, A., Goto, E. e Kozai, T. 2006. Evaporation characteristics in a naturally ventilated, fog-cooled greenhouse. *Renewable energy*. 31:2207-2226.
- Afonso, J. 2005. Utilização de sistemas de aquecimento por ar e por água quente em estufas. Trabalho fim curso de Engenharia Agrícola da Universidade de Évora. Évora
- AIFF, 2010. Relatório de caracterização da fileira florestal 2010. Associação para a competitividade da indústria da fileira florestal, 80 pp
- Albright, L. 1990. Environmental control for Animals and Plants. ASAE Textbook N.º4. The American Society of Agriculture Engineers. Michigan.
- Alfenas, A., Zauza, E., Mafia, R. e Assis, T. 2004. Clonagem e doenças do eucalipto. Editora UFV. Universidade Federal de Viçosa. 442 pp
- Allen, R., Smith, M., Pereira L. e Perrier. A. 1994. An update for the calculation of reference evapotranspiration. *ICID Bulletin*, 43: 35-92.
- Araújo, C., Neves, L. e Louro, M. 2004. Programa operacional de produção de estacas- Relatório 134. Altri Florestal Séries de Investigação.
- ASHRAE 2005. Thermodynamics and refrigeration cycles In ASHRAE Handbook - Fundamentals
- Assis, T. 1997, Propagação vegetativa de *Eucalyptus* por microestacaria. In Conferência IUFRO sobre silvicultura e melhoramento genético de eucaliptos. pp 300-304
- Assis, T., Fett-Neto, A., e Alfenas A. 2004. Current techniques and prospects for the clonal propagation of hardwood with emphasis on *Eucalyptus*. In Plantation forest biotechnology for the 21st century. New Delhi, India.
- Baille, A. e Gonzalez-Real, M. 2001. Utilization de modelos para el control y la ayuda a la decision en invernaderos. Situación e perspectivas. In: Cajamar (ed), Incorporación de tecnologia al invernadero mediterráneo. Estación experimental “Las Palmerollas”, Almeria.
- Bakker, J. e Challa, H. 1995. Aim and approach of this book. In Greenhouse Climate Control. An integrated approach. Eds. J.C. Bakker, G.P.A. Bot, H. Challa, N.J. Van de Braak. Wageningen Pers, Wageningen, 279 pp
- Bakker, J. e Holsteijn, G. 1995. Screens. In Greenhouse Climate Control. An integrated approach. Eds. J.C. Bakker, G.P.A. Bot, H. Challa, N.J. Van de Braak. Wageningen Pers, Wageningen, 279 pp
- Baptista, F. 2007. Modelling the climate in unheated greenhouse and predicting *Botrytis cinerea* infection. PhD Thesis. Universidade de Évora, Évora 180 pp.
- Baptista, F. e Cruz, V. 2007. Ventilação natural de estufas – princípios físicos. *Revista INGENIUM*.
- Baptista, F., Bailey, B., Meneses J. e Navas L. 2010. Greenhouse climate modelling. Tests, adaptation and validation of a dynamic climate model. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 8:285-298.
- Benavente, R., Garcia, J., Navas L., Elena, F. e Pastor, M. 2000. Automatismos de control del clima en invernaderos. *Horticultura* 149: 20-41
- Boulard, T. e Baille A. 1995. Natural ventilation of a greenhouse with continuous roof vents. *Journal of agricultural engineering research* 61: 37-48
- Boulard, T., Feuilloley, P. e Kitas, C. 1997. Natural ventilation performance of six greenhouse and tunnel types. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 67:249-266.

- Bot, G. e Braak, N., 1995. Physics of greenhouse climate. In Greenhouse Climate Control. An integrated approach. Eds. J.C. Bakker, G.P.A.Bot, H. Challa, N.J.Van de Braak. Wageningen Pers, Wageningen, 279 pp
- Braak, N. 1995. Greenhouse construction and equipment – heating equipment. . In Greenhouse Climate Control. An integrated approach. Eds. J.C. Bakker, G.P.A.Bot, H. Challa, N.J.Van de Braak. Wageningen Pers, Wageningen, 279 pp
- Breuer, J. e Knies, P., 1995. Greenhouse construction and equipment. . In Greenhouse Climate Control. An integrated approach. Eds. J.C. Bakker, G.P.A.Bot, H. Challa, N.J.Van de Braak. Wageningen Pers, Wageningen, 279 pp
- Brito, M. 2006. Análise estatística. Apontamentos da ESA de Ponte de Lima.
- Castilla, N. 2001. La radiación solar en invernadero en la costa mediterránea española. In Incorporación de tecnología al invernadero Mediterráneo – Estación Experimental – “Las Palmerillas” de Cajamar.
- Castilla, N. 2005. Invernaderos de plástico: Tecnología y manejo. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.
- Coelho, M. 2005. Utilização de sistemas de aquecimento por ar e por água quente em estufas. Trabalho fim curso de Engenharia Agrícola da Universidade de Évora. Évora
- Coelho, M., Baptista, F., Cruz, V. e Garcia, J. 2006. Comparison of four natural ventilation systems in a mediterranean greenhouse. *Acta Horticulturae*, 719:157-164.
- Corrêa, L. e Fett-Neto, A. Effects of temperature on adventitious root development in microcuttings of *Eucalyptus saligna* Smith and *Eucalyptus globulus* Labill. *Journal of Thermal Biology* 39:315-324
- Cunha, A., Paiva, H., Leite, H., Barros, N., e Leite, F. 2006. Relações entre variáveis climáticas com produção e enraizamento de estacas de eucalipto, *Revista Árvore*, Viçosa-MG V.33 N.º 2:195-203.
- Day, W. e Bailey, B., 1999. Physical principles of microclimate modification. In Greenhouse Ecosystems, Eds by G. Stanhill and H. Zvi Enich, Elsevier.
- Field, A. 2005. Discovering statistics using SPSS. Second Edition. SAGE publications London. pp 779.
- Fuchs, M., Dayan, E. and Presnec, E. 2006. Evaporative cooling of a ventilated greenhouse crop. *Agricultural and Forest Meteorology*, 138:203-215.
- Gonzalez-Real, M. e Baille, A., 2000. Control del clima bajo invernadero. In Tecnología para cultivos de alto rendimiento. Coord Alarcón A. Ed. Novedades Agrícolas S.A
- Gonzalez-Real, M., Baille, A. e Delmon, D. 1994. A simplified model for predicting evapotranspiration rate of nine ornamental species vs. climate factors and leaf area. *Scientia Horticulturae*, 59:143-155.
- Gonzalez-Real, M., Baille, A. e Delmond, D. 1994b. Microclimate and transpiration of greenhouse rose crop. *Agriculture and Forestry Meteorology* 71:83-97
- González-Real, M. Romero, R. e Baille, A. 1996. Stomata conductance of rose whole plants in greenhouse conditions: analysis and modelling. *The Journal of Horticultural Science*, 71:57-70.
- Hanan, J.J., Holley, W.D. and Goldsberry, K.L. 1978, Conversion tables, in Greenhouse Management, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York.
- Hernandez, J. 2000, El microclima dentro del invernadero. In Tecnología para cultivos de alto rendimiento. Coord Alarcón A. Ed. Novedades Agrícolas S.A.

- Hortisol 2006. Integration des processus energetiques dans les cultures sous abris. Project Hortisol. Conderation Suisse.
- Jarvis, W., 1998. Control de Enfermedades en cultivos de invernadero. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid
- Joliet, O. 1994. Hortitrans, a model for predicting and optimizing humidity and transpiration on greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 57:23-37.
- Kittas, C. Bartanzas, T. e Jaffrin, A. 2003. Temperature gradients in a partially shaded large greenhouse equipped with evaporative cooling pads. *Biosystems Engineering*, 85:87-94.
- Landis, T.D., Tinus, R.W., McDonald, S.E., Barnett, J.P., 1992, Atmospheric environment, Vol. 3, The container tree nursery manual. Agric. Handbook U.S. Department of Agriculture, Forest Service 145p.
- López, J., 2000. Sistemas de calefacción. . In Calefacción de invernaderos en el sudeste español. Estacion Experimental – “Las Palmerillas” de Cajamar.
- López, J. 2001. Sistemas de calefacción. In Incorporación de tecnología al invernadero mediterráneo. Estacion Experimental – “Las Palmerillas” de Cajamar
- Lorenzo, P. 2000. Influencia de la temperatura en el crecimiento y desarrollo de los cultivos. In Calefacción de invernaderos en el sudeste español. Estacion Experimental – “Las Palmerillas” de Cajamar.
- Lucas, E., Randall J. e Meneses J. 2000. Potential for evaporative cooling during heat stress periods in pig production in Portugal (Alentejo). *Journal of Agricultural Engineering Research*, 76:363-371.
- Morgan, L., 2001, Hitting the target, IN Practical hydroponic and greenhouses n.º 57
- Munters Euroemme 2000. Fans –use, maintenance and installation instruction manual. Italy.
- NATDAMUS 2010. Equation describing the physical properties of moist air at «<http://www.natmus.dk/cons/tp/atmcalc/atmoclc1.htm>»
- Nelson, P. 1991. Greenhouse – operation and management. 4ª edição, Prentice Hall, New Jersey.
- Perales, A., Perdignes, A., Garcia, J., Montero, J., e Antón, A.. 2003. El control de la condensación en invernaderos. *Horticultura*, 168:14-19.
- Perales, A. Garcia, J., Romero, A., Benavente, R. e Luna, L. 2004. Greenhouse relative control with heating and ventilation strategies. *Proc. of International Symposium New trends in farm buildings*, Évora.
- Perdignes, A., Garcia, J., Luna, L., Montero, J. e Miñoz, P. 2005. Comparative test and modelling of humidity control strategies in mediterranean greenhouse placed in continental and coastal sites. *Acta Horticulturae*, 691:195-202.
- Perdignes, A., Garcia, J., Romero, A., Rodríguez, A., Luna, L., Raposo, C. e Plaza, S. 2008a. Cooling strategies for greenhouse in summer: control of fogging by pulse with modulation. *Biosystems Engineering*, 99:573-586.
- Perdignes, A. Valiño, V., Garcia, J., Baptista, F., Montero, J., Benavente, R., e Plaza, S. 2008b. Experimental results and modelling of humidity control strategies for greenhouse in continental and coastal settings in the Mediterranean region. I: Experimental results and model development. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 6:189-198.
- Polysack 2010. Aluminet I. «www.polysack.com»

- Rodríguez, A. 2009. Métodos de predicción y técnicas de la condensación en invernaderos. PhD Tesis, Universidad Politécnica de Madrid. Madrid.
- Scarassati, A. Avaliação ambiental e nutricional da produção de microcepas e microestacas de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* em sistema hidropônico em casa de vegetação. Tese de Douturamento da Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu. São Paulo. pp 134
- Stanghellini, C., Meurs, W. 1992. Environmental control of greenhouse crop transpiration. *Journal of Agricultural Engineering* 51:297-311.
- Trigui, M., Barrington, S. e Gauthier, L. 2001. A strategy for greenhouse climate control, Part I: Model development. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 78:407-413.
- Villardón, J. 2006. ANALISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES Departamento de Estadística, Universidad de Salamanca. Cursos de Doctorado, 2004-2006. 38 pp.
- Waaijenberg, D. 1995. Greenhouse construction and equipment - Construction. In *Greenhouse Climate Control. An integrated approach*. Eds. J.C. Bakker, G.P.A. Bot, H. Challa and N.J. Van de Braak. Wageningen Pers, Wageningen, 279 pp.
- Wilson, P. 1998, Environmental preferences of *Eucalyptus globulus* stem cuttings in one nursery. *New Zeland Journal of Forestry Science*. 8:304-315
- Zabelitz, C. 1999. Greenhouse structures. In *Greenhouse Ecosystems*, Eds. G. Stanhill and H. Zvi Enich, Elsevier. 423 pp.
- Zolnier, S., Gates, R., Buxton, J. e Mach, C. 2000. Psychrometric and ventilation constraints for vapor pressure deficit control. *Computers and electronics in Agriculture* 26:343-359

Anexos

Anexo 1

Comunicações orais apresentadas e artigos aceites para publicação

M. Louro, F.J. Baptista & I. Mourão. Climate modelling of a greenhouse with proportional environmental control. ISHS International Symposium on Advanced technologies and management towards sustainable greenhouse ecosystems - GreenSys 2011, 5-10 Junho 2011, Chalkidiki, Grécia.

M. Louro, F.J. Baptista e I. Mourão. Modelação do clima em estufa climatizada com sistema de controlo proporcional - Modelo de aquecimento. VI Congresso Ibérico de Agro-Engenharia, organizado pela Univ. Évora, SCAP e Sociedad Española de Agroingeniería, 5-7 de Setembro de 2011, Évora, Portugal.

Climate modelling of a greenhouse with proportional environmental control

M. Louro

AltriFlorestal S.A. Quinta do Furadouro,
2510-582 Olho Marinho, Portugal,
mlouro@altri.pt

I. Mourão

Escola Superior Agrária de Ponte de Lima
/IPVC, Refóios, 4990-706 Ponte de Lima,
Portugal; Centro de Investigação de
Montanha (CIMO), ESA - Instituto
Politécnico de Bragança,
isabelmourao@esa.ipvc.pt

F.J. Baptista

Universidade de Évora/ICAAM, Escola de
Ciências e Tecnologia, Departamento de
Engenharia Rural, Núcleo da Mitra,
Apartado 94, 7002-554 Évora, Portugal,
fb@uevora.pt

Keywords: greenhouse, climate model, energy balance, mass balance, evaporative cooling

Abstract

Performance of greenhouse environmental control systems can be evaluated by (means of) predictive climate models. In this work, a model for the prediction of environmental parameters such as temperature and humidity based on energy and mass balances, was developed and validated for a greenhouse controlled with a proportional environmental control system. The greenhouse is in Viveiros do Furadouro, a forestry nursery from the Altri Group, located near Óbidos, Portugal. The greenhouse under study is a Venlo greenhouse covered with glass with an area of 1632 m² and is used for *Eucalyptus globulus* Labbill. vegetative propagation through minicuttings. *Eucalyptus globulus* is characterized by having low rooting ability and environmental control has to be very accurate and requires the use of multiple control equipments, such as heating, cooling (pad or fog), thermal/shade screens, natural and dynamic ventilation. The proportional control of each equipment, such as the fan and wet pad for cooling, is difficult and requires good knowledge of the dynamics of greenhouse environmental parameters, as well as the influence of individual equipment. However, it allows different alternatives to achieve the set points. The climate data were recorded every 8 minutes and were used to develop a climatic model based on energy and mass balances, to use for prediction of internal environmental parameters. Information about the activation percentage of the environmental control systems was also included. The extraction of the coefficients for the balances combines direct calculation and interaction using Microsoft Excel[®] SOLVER[®], until reaching the minimum absolute difference between simulated and measured inside temperature and humidity. The climate model was validated by comparison between measured and simulated values for temperature and humidity. This model can be used to optimize the greenhouse environment in order to achieve the production objectives.

INTRODUCTION

In greenhouse production, environmental control is a factor as relevant as nutrition and watering. Climate models are a powerful tool to use in greenhouse physical environment research (Castilla, 2005), in greenhouse design projects and environmental control (climate, watering and fertilization), as well as for evaluation of crop growth and development (Baille and González-Real, 2001). Baptista (2007) also used climate models for the prediction of environmental conditions that affect *Botrytis cinerea* infection in unheated tomato greenhouses. Other models for simulating greenhouse internal conditions and physiological processes have also been described (Jolliet, 1994; González-Real *et al*, 1994, 1996) and they allow profit maximization for the grower (Castilla, 2005).

Climate models are generally based on energy and mass balances for prediction of the inside air temperature and humidity considering the outside climate conditions, such as

temperature, humidity, wind and solar radiation, as well as the characteristics of the greenhouse and of the environmental control systems. Energy balances are the sum of the heat gains and losses, during a certain period of time. This method assumes the steady state and uses the principle of energy conservation, which means that heat gains are equal to heat losses plus a term referring to the heat storage of the greenhouse (Baptista 2007), while the factor time makes the energy balance dynamic. In these conditions, the energy fluxes could be different from zero in each period, and energy is stored or released by the thermal mass, affecting the value of inside air temperature in the next period considered. Perales *et al* (2004) and Perdignes *et al* (2005) described a model to estimate air temperature, based on the air temperature of the previous period, heat gains from the heating system and solar radiation, heat losses through the cover and the ventilation and the greenhouse heat storage capacity. Perdignes *et al* (2008a), for the same greenhouse, tested the inclusion of an evaporative cooling system, adding to the first model a factor to convert sensible heat into latent heat, due to the evaporation of water. These authors described a model that allows simulation of the inside water vapour content, as a function of the previous vapour concentration, the evapotranspiration and the moisture losses through the greenhouse structure and windows.

The major problem in greenhouse evaporative cooling based on cooling pads and extracting fans, is the thermal gradient along the air flow. Kittas *et al* (2003) in a 60 m length greenhouse found gradients for the air temperature higher than 8°C, between the pads and fans. These authors presented a simple model to determine the temperature at the middle and at the end of greenhouse. Fuchs *et al* (2006) developed a procedure to evaluate latent heat cooling, by means of crop transpiration and free water evaporation from wet pad and fans system.

As *Eucalyptus globulus* is characterised by having low rooting ability, the environmental control has to be very accurate and requires the use of multiple control equipments for temperature and relative humidity control. The proportional control of these equipments, such as fan and wet pad for cooling for example, is difficult, and needs good knowledge of the dynamics of greenhouse environmental parameters, as well as the influence of individual equipment. However, it has the advantage of allowing different alternatives to obtain the defined set points.

Although, most of the published models were developed with data from specific experimental designs. In this work, data were obtained in a commercial production greenhouse, with all the environmental control systems working at the same time and without a specific experimental design. The main objective of this work was to develop and validate a model for simulation of the air temperature and humidity, using energy and mass balances for the summer season (cooling model), which can be used to optimize the greenhouse environment in order to improve rooting ability and shorten the production period.

MATERIAL AND METHODS

Data were recorded in a commercial greenhouse of Viveiros do Furadouro, property of the Altri Group, located at Olho Marinho, Óbidos, Portugal. The greenhouse is equipped for clonal propagation of *Eucalyptus globulus* Labill by the minicutting technique and is a Venlo greenhouse covered with glass, with an area of 1632 m² and a mean height of 5.73 m. The environment of the greenhouse is automatically controlled by a climatic software (Climagro TM) and the greenhouse is equipped with movable benches.

The greenhouse environmental control system includes equipments such as, heating, cooling (pad or fog), thermal/shade screens, natural and dynamic ventilation. The data used for this study starts on the 1th of July and ends on the 31th of August 2010.

Climate data and information about the equipment status were recorded every 8 minutes. The data from each day of August (31 days) were used for the coefficient extraction and model development, and the data of July (31 days) were used for the model validation. The model used to simulate the air temperature was based on Perales *et al* (2004) and Perdigones *et al* (2005; 2008b) studies, by adding one more coefficient to determine the latent heat of water evaporated from the wet pad ($Q_P - W.m^{-2}$) as showed in equation 1.

$$Ti_{(t)} = Ti_{(t-1)} + \frac{Q_H + Q_{SRI} - Q_C - Q_J - Q_V - Q_F - Q_P}{C} \quad (1)$$

where internal temperature ($Ti_{(t)}$, °C) is calculated by the temperature of previous period plus a difference due to heating storage. It includes the gains from the heating system (Q_H , $W.m^{-2}$) and from the solar radiation (Q_{SRI} , $W.m^{-2}$); losses through the cover material (Q_C , $W.m^{-2}$), through the windows (Q_J , $W.m^{-2}$) and dynamic ventilation (Q_V , $W.m^{-2}$); conversion of sensible into latent heat due to water evaporation from fog (Q_F , $W.m^{-2}$) and wet pad (Q_P , $W.m^{-2}$) and, finally, the greenhouse heat storage capacity (C , $W.m^{-2}.°C^{-1}$). Heat gain due to solar radiation was calculated as $Q_{SRI} = \tau b \times R_s$, b being the percentage of solar radiation converted into sensible heat (Q_s), τ the transmissivity of the cover to solar radiation (%) and R_s the solar radiation measured outside ($W.m^{-2}$). Each of the equation components is calculated as:

$$\begin{aligned} Q_H &= H \times Q_h & Q_{SRI} &= \tau b \times R_s & Q_C &= U \times \Delta T & Q_J &= J \times Q_j \\ Q_V &= V \times Q_v & Q_F &= F \times Q_f & Q_P &= P \times Q_p \end{aligned}$$

where H , τb , U , J , V , F and P are adjustment coefficients or expressions that were obtained in this work. Q_h is the energy emitted by the heating system ($W.m^{-2}$), Q_j and Q_v are the heat losses due to ventilation ($W.m^{-2}$) calculated as a function of ventilation rate and vents areas, Q_f and Q_p are calculated as a function of the mass of water evaporated ($W.m^{-2}$) and ΔT is the air temperature difference (°C) between the inside and outside of the greenhouse. The mass balance was also based in studies of the same authors:

$$Cvi_{(t)} = Cvi_{(t-1)} + A_1 RS_i + B_1 \times VPD + E_f + E_p - E_e - E_j - E_v \quad (2)$$

The vapour content of inside air (C_{vi} , $g.kg^{-1}$) was determined as a function of $C_{vi(t-1)}$, which is the previous vapour concentration; A_1 is the coefficient of evapotranspiration ($g.kg^{-1}.W^{-1}.m^2$) related to incident solar radiation; B_1 is the coefficient of evapotranspiration ($g.kg^{-1}.kPa^{-1}$) proportional to vapour pressure deficit (VPD, kPa); E_f is the water evaporated from fog; E_e is the vapour losses through greenhouse cover and structure; E_j and E_v are the vapour losses through the windows and fans, and E_p is the vapour gains from wet pad.

The moisture coefficients E_f and E_p were calculated according to Jolliet (1994) and Trigui *et al* (2001), and expressed in grams of water vapour per kilogram of dry air ($g.kg^{-1}$). This approach considers the linearization of the water balance equation and uses the adjusted values of Q_F and Q_P obtained with the energy balances and expressed in $W.m^{-2}$.

$$E_{f(p)} = \left(\frac{Q_{F(p)}}{\frac{\lambda}{V_g}} \right) \times V_e \times t \times 10^3$$

V_g is the greenhouse volume ($m^3.m^{-2}$), V_e is the air specific volume ($m^3.kg^{-1}$) λ is the latent heat ($J.kg^{-1}$) and t is the time in seconds. In the same way, E_e , E_j and E_v were calculated according to Jolliet (1994), being γ the psychrometric constant ($kPa.°C^{-1}$) and e_{ai} and e_{ae} are the inside and outside air vapour pressure (kPa). $Q_{C(J,V)}$ are expressed in $W.m^{-2}.°C^{-1}$:

$$E_{e(j,v)} = \left(\frac{\frac{Q_{C(J,V)}}{\lambda\gamma} (e_{ai} - e_{ae})}{V_g} \right) \times V_e \times t \times 10^3$$

After obtaining the moisture content and knowing the temperature, it is possible to obtain the air relative humidity, calculated by the equation proposed by Perales *et al* (2003) and Coelho *et al* (2006).

As the greenhouse is a production unit, it was not possible to make a plan to test different control strategies, in order to obtain the model coefficients by statistical analysis. For that reason, in this study, the extraction of the coefficients for the sensible and latent balances, combined direct calculation, from physical properties of individual fluxes, and interactions using Microsoft Excel® SOLVER®, until reaching the minimum absolute difference between simulated and measured inside air temperature and humidity.

Coefficients of the model were obtained using August climate data. Each day was simulated separately, using the temperature and water vapour content as inputs for the simulation. The air temperature was adjusted in first place followed by the humidity. The model validation was performed by means of graphical comparison between measured and simulated values and by statistical analysis using SPSS V15.0. ANOVA tests, root mean square error (RMSE) and maximum absolute error were calculated.

RESULTS AND DISCUSSION

The obtained energy and mass coefficients of the models are presented in Table 1. Different coefficients were found for the presence or absence of screens. The presence of screens reduced approximately 20% of the heat gains due to solar radiation. If we assume an average solar radiation transmission through the cover of 0.88 (Waaijenberg, 1995 and Zabeltitz, 1999), results showed that 8.7% and 10.9 % of solar radiation was converted into sensible heat with and without screen, respectively. The coefficient with screen was identical to the values obtained by Perales *et al* (2004) and Perdigones *et al* (2005; 2008a), but the value without screen was lower. This difference could be justified by the low set point for closing the screens (300 W.m⁻²).

The coefficient for global losses through the structure (U) was initially selected from the literature as 6 W.m⁻².°C⁻¹ and corrected during the model adjustment process. The values obtained showed that the screens reduced the heat losses nearly by 19%. The heating system is used mainly for humidity reduction during the first hours of the day when DPV is lower than 0.3 kPa. Óbidos is located in the Atlantic coast of Portugal, where the summer is characterised by having early fog in the morning and in the end of the afternoon. This fog reduces the solar radiation incidence, so the screens were open when the heating system was on. Without screen, only 13% of the energy supplied from the heating system is converted to sensible heat, while with the screen this value rises to 80%.

The ventilation rate through the windows was slightly affected by the screens, because of the small differences of inside and outside temperature, which reduces the thermal buoyancy effect and the wind speed was not high enough to increase ventilation rates. The differences for dynamic ventilation could be justified due to the volume reduction with screens and the shade effect.

Under summer conditions, the fog system worked mainly when the screen was extended and it was installed below the screen. This aspect justifies the small influence of the screen in the conversion of sensible into latent heat by water evaporation. Another system that converts sensible into latent heat is the cooling pad. The observed values are very low comparing with those obtained by Lucas *et al* (2000). The main reason could be

the simultaneous action of competitive systems, like the fog that increases the moisture content of the air and reduces the efficiency of the wet pad. The heat storage capacity of the “Venlo” greenhouse was similar to the values obtained by Perales *et al* (2004).

Figure 1a) shows that more than 83% of the variability of the air temperature could be explained by the model. The statistical analysis conducted to compare measured and simulated temperature, showed a RMSE of 0.79 °C and an absolute difference of 0.98 °C. As for the relative humidity, we found a RMSE of 4.31 % and an absolute difference of 6.78 %. Figure 1b) reflecting a major difference between measured and simulated values. However, the lines follow the same trend and the statistical parameters showed a reasonable adjustment as obtained by other authors. Perales *et al* (2008a) obtained a mean absolute error between 1.3 to 2.1°C for temperature and 5.7 to 8.8 % for relative humidity. Baptista *et al* (2010) found RMSE between 1.28 and 2.0 °C for temperature and 6.9 and 7.1 % for relative humidity. Figure 2 shows the measured and simulated values for temperature and relative humidity from 3 to 7 of July 2010, where a good adjustment for the measured and predicted temperature was shown as well as a reasonable adjustment for the humidity. Table 2 shows the results of the statistical analysis using ANOVA conducted to compare the means obtained with the recorded data and with the results obtained by using the models and it can be seen that no significant differences were found.

CONCLUSIONS

A model to estimate air temperature and relative humidity was developed and validated for a greenhouse equipped with a proportional environmental control systems. The statistical analysis showed that no significant differences were found between measured and predicted values. The model can be used to predict internal air temperature and relative humidity for different outside conditions and/or with different managing strategies of the climate control equipments available. The climate model, and further work in dissecting the most favourable conditions for rooting ability, should be a promising tool to manage the available equipments to attain a better control of inside environmental conditions.

Acknowledgements

The authors wish to thank Altri Florestal and Viveiros do Furadouro for the opportunity to conduct this work.

Literature Cited

- Baille, A. and Gonzalez-Real, M. 2001. Utilization de modelos para el control y la ayuda a la decision en invernaderos. Situación e perspectivas. In: Cajamar (ed), Incorporación de tecnologia al invernadero mediterráneo. Estación experimental “Las Palmerollas”, Almeria.
- Baptista, F. 2007. Modelling the climate in unheated greenhouse and predicting *Botrytis cinerea* infection. PhD Thesis. Universidade de Évora, Évora 180 pp.
- Baptista, F., Bailey, B., Meneses J. and Navas L. 2010. Greenhouse climate modelling. Tests, adaptation and validation of a dynamic climate model. Spanish Journal of Agricultural Research, 8:285-298.
- Castilla, N. 2005. Invernaderos de plástico: Tecnologia y manejo. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.

- Coelho, M., Baptista, F., Cruz, V. and Garcia, J. 2006. Comparison of four natural ventilation systems in a mediterranean greenhouse. *Acta Horticulturae*, 719:157-164.
- Fuchs, M., Dayan, E. and Presnoc, E. 2006. Evaporative cooling of a ventilated greenhouse crop. *Agricultural and Forest Meteorology*, 138:203-215.
- Gonzalez-Real, M., Baille, A. and Delmon, D. 1994. A simplified model for predicting evapotranspiration rate of nine ornamental species vs. climate factors and leaf area. *Scientia Horticulturae*, 59:143-155.
- Gonzalés-Real, M. Romero, R. and Baille, A. 1996. Stomata conductance of rose whole plants in greenhouse conditions: analysis and modelling. *The Journal of Horticultural Science*, 71:57-70.
- Jolliet, O. 1994. Hortitrans, a model for predicting and optimizing humidity and transpiration on greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 57:23-37.
- Kittas, C. Bartanzas, T. and Jaffrin, A. 2003. Temperature gradients in a partially shaded large greenhouse equipped with evaporative cooling pads. *Biosystems Engineering*, 85:87-94.
- Lucas, E., Randall J. and Meneses J. 2000. Potential for evaporative cooling during heat stress periods in pig production in Portugal (Alentejo). *Journal of Agricultural Engineering Research*, 76:363-371.
- Perales, A., Perdigones, A., Garcia, J., Montero, J., and Antón, A.. 2003. El control de la condensación en invernaderos. *Horticultura*, 168:14-19.
- Perales, A. Garcia, J., Romero, A., Benavente, R. and Luna, L. 2004. Greenhouse relative control with heating and ventilation strategies. *Proc. of International Symposium New trends in farm buildings*, Évora.
- Perdigones, A., Garcia, J., Luna, L., Montero, J. and Miño, P. 2005. Comparative test and modelling of humidity control strategies in mediterranean greenhouse placed in continental and coastal sites. *Acta Horticulturae*, 691:195-202.
- Perdigones, A., Garcia, J., Romero, A., Rodríguez, A., Luna, L., Raposo, C. and Plaza, S. 2008a. Cooling strategies for greenhouse in summer: control of fogging by pulse with modulation. *Biosystems Engineering*, 99:573-586.
- Perdigones, A. Valiño, V., Garcia, J., Baptista, F., Montero, J., Benavente, R., and Plaza, S. 2008b. Experimental results and modelling of humidity control strategies for greenhouse in continental and coastal settings in the Mediterranean region. I: Experimental results and model development. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 6:189-198.
- Trigui, M., Barrington, S. and Gauthier, L. 2001. A strategy for greenhouse climate control, Part I: Model development. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 78:407-413.
- Waaijenberg, D. 1995. Greenhouse construction and equipment - Construction. In *Greenhouse Climate Control. An integrated approach*. Eds. J.C. Bakker, G.P.A. Bot, H. Challa and N.J. Van de Braak. Wageningen Pers, Wageningen, 279 pp.
- Zabelitz, C.V. 1999. Greenhouse structures. In *Greenhouse Ecosystems*, Eds. G. Stanhill and H. Zvi Enich, Elsevier. 423 pp.

Table 1 - Energy and mass coefficients of the described models obtained by data analysis.
(x is the percentage of screen activation, %)

	Expressions	Without screens (0%)	With Screens (100%)
τb (dimensionless)	$\tau b = -2 \times 10^{-4} x + 0.096$	0.096	0.076
U ($\text{W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)	$U = -0.001 x + 5.173$	5,173	4,180
H (dimensionless)	$H = 0.007 x + 0.131$	0.131	0.806
J (dimensionless)	$J = 2 \times 10^{-4} x + 0.921$	0.921	0.936
V (dimensionless)	$V = 0.002 x + 0.608$	0.608	0.775
F (dimensionless)	$F = 0.001 x + 0.924$	0.924	0.999
P (dimensionless)	$P = -0.002 x + 0.463$	0.463	0.238
C ($\text{W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)	$C = 0.070 x + 46.093$	46.093	53.104
$A1$ ($\text{g.kg}^{-1}.\text{W}^{-1}.\text{m}^2$)	$A1 = 1 \times 10^{-5} x + 0.001$	0.001	0.002
$B1$ ($\text{g.kg}^{-1}.\text{kPa}^{-1}$)	$B1 = 0.001 x + 0.110$	0.110	0.017

Table 2 – Results of the statistical analysis (ANOVA)

	Measured (mean \pm SD)	Simulated (mean \pm SD)	P
Temperature	21.99 \pm 0.65	22.22 \pm 1.32	0.377
Relative humidity	79.77 \pm 2.84	78.47 \pm 4.73	0.194

*Significant differences $P < 0,05$

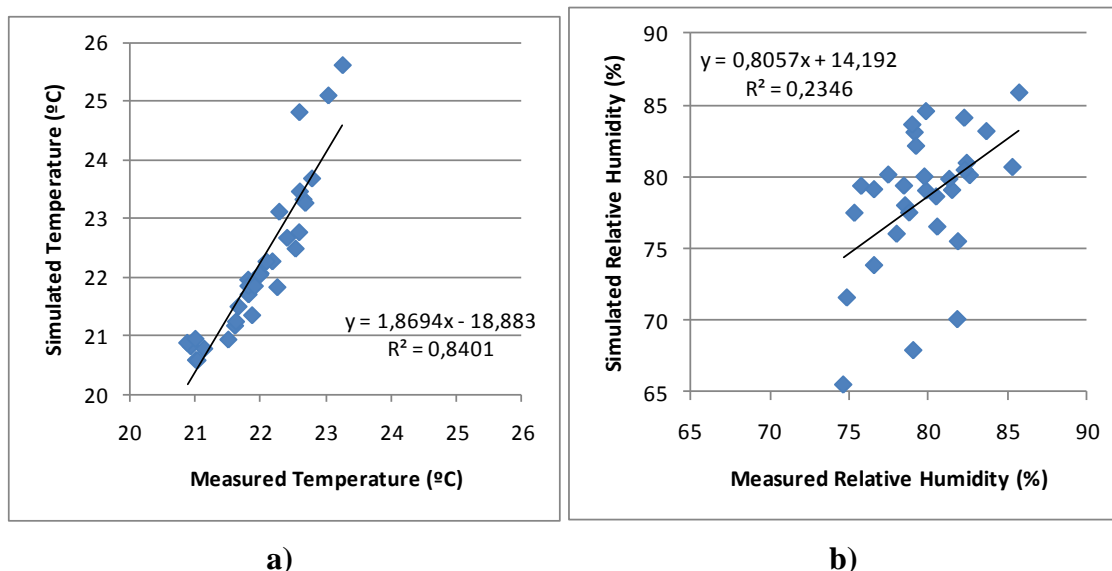


Figure 1 - Relationship between simulated and measured air temperature (a) and relative humidity (b) for the validation period.

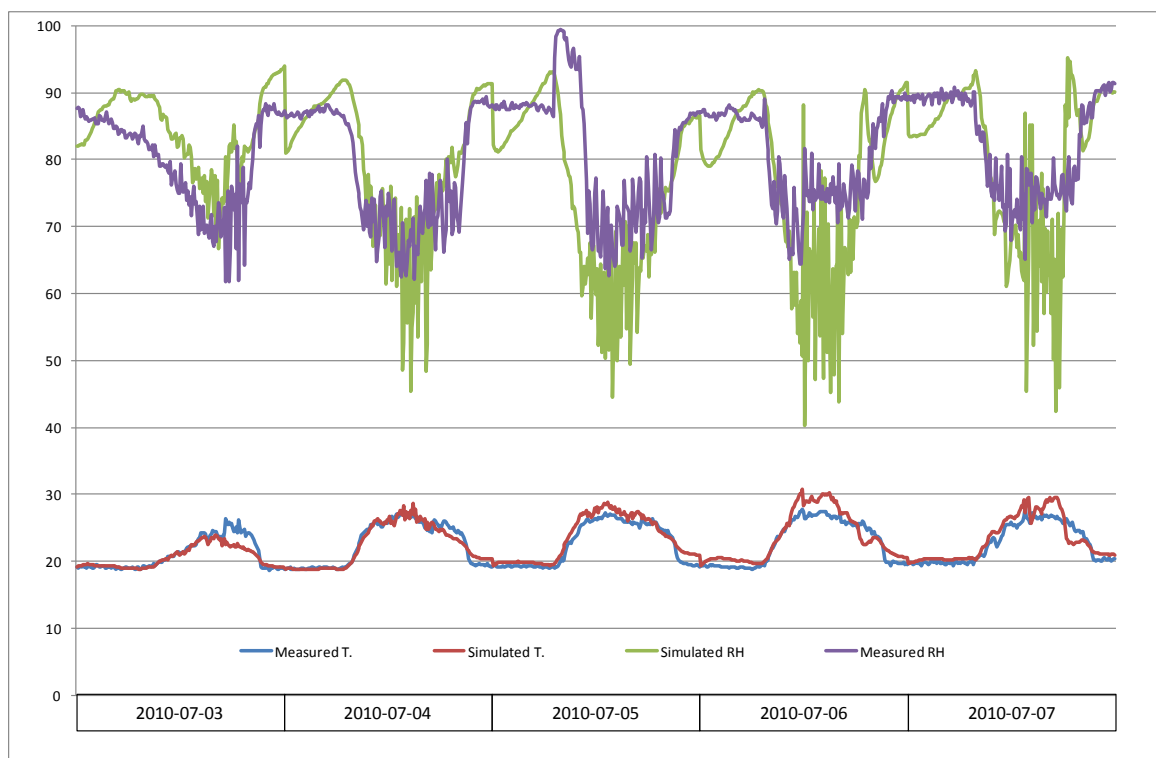


Figure 2 - Measured and simulated values for temperature (T, °C) and relative humidity (RH, %) from the period between 3 and 7 July 2010.

MODELAÇÃO DO CLIMA EM ESTUFA CLIMATIZADA COM SISTEMA DE CONTROLO PROPORCIONAL – MODELO DE AQUECIMENTO

M. Louro¹, F.J. Baptista² e I. Mourão^{3,4}

¹Altri Florestal S.A. Quinta do Furadouro, 2510-582 Olho Marinho, Portugal, mlouro@altri.pt

²Universidade de Évora/ICAAM, Escola de Ciências e Tecnologia, Departamento de Engenharia Rural, Núcleo da Mitra, Apartado 94, 7002-554 Évora, Portugal, fb@uevora.pt

³Escola superior Agrária de Ponte de Lima, Instituto Politécnico de Viana do Castelo, Refóios, 4990-706 Ponte de Lima, Portugal, isabelmourao@esa.ipv.pt

⁴Centro de Investigação de Montanha, ESA/IPB, Campus de Stª Apolónia, Ap. 1172, 5301-855, Bragança, Portugal.

Resumo

O controlo ambiental em culturas protegidas assume uma grande importância e, a par da rega e da nutrição, é um dos factores limitantes do crescimento e desenvolvimento das plantas. A eficácia deste controlo pode ser avaliada pela utilização de modelos matemáticos para a previsão das condições climáticas interiores, que após a sua validação, permite a simulação para diferentes condições climáticas exteriores e/ou diferentes estratégias de funcionamento dos equipamentos de condicionamento ambiental. Neste trabalho é apresentado um modelo de simulação de temperatura e de humidade, baseado em balanços de energia e de massa para uma situação de Inverno – modelo de aquecimento. O modelo foi desenvolvido para uma estufa do tipo “Venlo” em vidro, equipada para a propagação clonal de *Eucalyptus globulus* Labill. pela técnica de miniestacaria. O modelo proposto foi validado estatisticamente comparando os valores medidos e simulados. As diferenças absolutas entre os valores de temperatura e humidade relativa medidos e simulados foram, respectivamente, de 1,31°C e 7,46% e o erro padrão da estimativa de 0,91°C e 7,65%.

Palavras-chave: Estufas, balanços de energia, balanços de massa, modelação.

Abstract

In greenhouse production, environmental control is a factor as relevant as nutrition and watering. The performance of environmental control systems can be evaluated by mathematical models for prediction of internal environmental conditions and, after validation, allows simulation of different external environmental conditions or different strategies for the environmental control equipment management. The present study suggests a model for prediction of internal temperature and relative humidity, based on energy and mass balances for the winter season – heating model. The model was developed for a Venlo greenhouse covered with glass, used for *Eucalyptus globulus* Labill. vegetative propagation through minicuttings. The proposed model was validated by comparison between measured and predicted values. The absolute differences between the measured and simulated temperature and relative humidity values were, respectively, 1.31°C and 7.46% and the root mean square error was 0.91°C and 7.65%.

Keywords: Greenhouse, climate model, energy balance, mass balance.

1 - Introdução

O controlo ambiental em culturas protegidas é de grande importância e, a par da rega e da nutrição, é um dos factores limitantes do crescimento e desenvolvimento das plantas. A eficácia deste controlo pode ser avaliada pela utilização de modelos matemáticos para a previsão das condições climáticas interiores e, após a sua validação, permite a simulação para diferentes condições climáticas exteriores e/ou diferentes estratégias de funcionamento dos equipamentos de condicionamento ambiental. De um modo geral, a previsão da temperatura interior é efectuada através da realização de balanços de energia e a humidade relativa através de balanços de massa.

Os balanços de energia são calculados pela soma das perdas e ganhos de energia que ocorrem num certo período de tempo e, permitem determinar a temperatura interior de uma estufa. Este método assume que, para o período de tempo considerado, as condições ambientais são constantes e usa o princípio de conservação de energia, onde os ganhos de

calor são iguais às perdas, acrescido de um termo referente à capacidade de armazenamento de calor pela estufa (Baptista, 2007). O factor tempo permite que o balanço se torne dinâmico. Nestas condições, os fluxos de energia podem ser diferentes de zero em cada período, levando a que a energia seja acumulada ou libertada como uma massa térmica, afectando a temperatura interior no período seguinte ao considerado ou conhecido (Perales *et al*, 2004, Perdignes *et al* 2005; 2008a; 2008b).

O balanço de energia de uma estufa pode ser explicado pela seguinte expressão (ASHRAE, 1985 citado por Zabeltitz, 1999):

$$Q_A + Q_{Rs} + Q_E + Q_R = Q_{CC} + Q_{Rt} + Q_{Cs} + Q_F + Q_{La} + Q_{Se} \quad (1)$$

Outra forma de expressar esta lei, é pela diferença entre a energia que entra e sai do sistema. Esta diferença é igual ao aumento da capacidade de retenção de energia pelo sistema (ASHRAE, 2005). No balanço apresentado na equação 1, são considerados como entradas os ganhos pelo sistema de aquecimento (Q_A , $W m^{-2}$), os ganhos por incidência de radiação solar (Q_{Rs} , $W m^{-2}$), os ganhos devido aos equipamentos e máquinas (Q_E , $W m^{-2}$) e os ganhos por respiração das plantas (Q_R , $W m^{-2}$). Como perdas consideram-se as perdas por condução e convecção (Q_{CC} , $W m^{-2}$), as perdas de radiação térmica (Q_{Rt} , $W m^{-2}$), as perdas de condução pelo solo (Q_{Cs} , $W m^{-2}$), as perdas por fotossíntese (Q_F , $W m^{-2}$), as perdas de calor latente (Q_{La} , $W m^{-2}$) e as perdas de calor sensível (Q_{Se} , $W m^{-2}$). Existem diversas equações de balanços de energia para estufas, destacando-se as que contemplam as componentes existentes nas estufas, normalmente relacionadas com o ar, as plantas, o solo e as coberturas (Zabeltitz, 1999). Perales *et al* (2004) e Perdignes *et al* (2005) determinaram a temperatura ambiente dos períodos de tempo seguintes, baseando-se na temperatura anterior e no diferencial de temperatura dado pelo balanço de energia.

A determinação dos coeficientes utilizados nos balanços de energia e de massa podem ser determinados por modelos físicos ou estatísticos. A determinação por métodos estatísticos, em condições de ensaio, pode ser realizada em função de um ajustamento automático, tal como foi realizado por Perales *et al* (2004), Perdignes *et al* (2005 e 2008b) e Afonso (2006). Stanghellini e Meurs (1992), Joliet (1994) e Baptista (2007) desenvolveram modelos físicos de previsão das condições ambientais em estufas. Joliet (1994) propôs o cálculo do balanço de massa baseado no princípio de conservação do vapor de água no ar da estufa (E_e , $kg m^{-2} s^{-1}$), cuja variação está relacionada com a transpiração da cultura (E_t , $kg m^{-2} s^{-1}$), com os ganhos de água por nebulização (E_n : $kg m^{-2} s^{-1}$), com as perdas de água por condensação (E_c , $kg.m^{-2}.s^{-1}$) e por ventilação (E_v , $kg m^{-2} s^{-1}$).

$$E_e = E_t + E_n - E_c - E_v \quad (2)$$

O *Eucalyptus globulus* Labill. é uma espécie caracterizada por ser recalcitrante ao enraizamento, sendo necessárias condições ambientais muito específicas para que se consiga obter enraizamentos aceitáveis do ponto de vista operacional. Estas condições muito específicas justificam a necessidade de existência de múltiplos sistemas de condicionamento ambiental, tais como aquecimento, arrefecimento evaporativo, humedificação, controlo da radiação solar, poupança energética, renovação de ar natural e dinâmica.

No presente trabalho pretendeu-se testar e validar um modelo que permita prever as condições climáticas no interior da estufa, considerando as condições meteorológicas exteriores e as características e equipamentos existentes na estufa em causa.

2 - Material e Métodos

O presente estudo foi realizado no compartimento destinado à propagação vegetativa nos Viveiros do Furadouro L.da, do grupo Altri. Este viveiro está localizado no Olho Marinho, Óbidos, na estrada nacional 114 (39° 20' 21'' N, 9° 13' 38'' W e altitude de 34 m). A estufa de propagação é do tipo “Venlo” com cobertura de vidro e uma área de 1632,0 m², altura média de 5,7 m e orientação Norte-Sul.

O presente estudo decorreu de 2 de Janeiro a 13 de Março de 2010. Em cada dia foram registados os dados climáticos exteriores (temperatura, humidade relativa, radiação solar e velocidade do vento), interiores (temperatura, humidade relativa e radiação solar) e os estados de activação (%) dos equipamentos existentes na estufa (aquecimento, arrefecimento, janelas, ventoinhas, sistema de nebulização e redes de sombra/térmicas), a cada 8 minutos. Foram utilizados os dados dos 28 dias do mês de Fevereiro para a determinação dos coeficientes e os restantes 37 dias foram utilizados para a validação do modelo.

A previsão da temperatura interior foi efectuada através da utilização dos balanços de energia desenvolvidos por Perales *et al* (2004), Perdignes *et al* (2005) e Perdignes *et al* (2008b) e ainda pelo acréscimo dos coeficientes necessários para contemplar todos os equipamentos e características da estufa em estudo. Assim, a equação geral do balanço de energia utilizada para a previsão da temperatura interior foi efectuada pela resolução da equação 3:

$$Ti_{(t)} = Ti_{(t-1)} + \frac{Q_A + Q_{Rs} - Q_{CC} - Q_J - Q_V - Q_N - Q_P}{C} \quad (3)$$

onde a previsão da temperatura interior num determinado instante $Ti_{(t)}$, é calculada com base na temperatura interior no instante anterior $Ti_{(t-1)}$, e no diferencial de temperatura que ocorre nesse instante. No cálculo da variação de temperatura entram os ganhos e perdas de energia já descritas na equação geral do balanço de energia, acrescido da influência da capacidade térmica da estufa (C , W m⁻² °C⁻¹), das perdas de energia que actuam pela transformação de calor sensível em calor latente (Q_{La} , W m⁻²), das perdas por evaporação de água pelo sistema de nebulização (Q_N , W m⁻²) e pelo painel evaporativo (Q_P , W m⁻²). Cada coeficiente do balanço de energia é determinado pelo cálculo físico de cada coeficiente e o ajustamento estatístico é efectuado de acordo com o estado de funcionamento das redes de sombra. Este ajustamento automático baseia-se na equação da recta (Φ), e na ferramenta SOLVER[®] do EXCEL[®].

$$\begin{aligned} Q_A &= \Phi_a \times Q_a & Q_{Rs} &= \Phi_{Rs} \times Rs & Q_{CC} &= \Phi_{CC} \times \Delta T \\ Q_J &= \Phi_j \times Q_j & Q_V &= \Phi_v \times Q_v & Q_N &= \Phi_n \times Q_f & Q_P &= \Phi_p \times Q_p \end{aligned} \quad (4)$$

O sistema de aquecimento do ar é realizado por termoventiladores (permutadores de calor aquecidos a água quente) que dissipam o ar pela estufa, sendo os ganhos de calor provenientes deste sistema (Q_a , W m⁻²) determinados pela resolução da seguinte equação:

$$Q_a = 176,617 FP \frac{AA}{100} \Phi_a \quad (5)$$

O sistema de aquecimento tem uma potência de 176,617 W m⁻², estabelecida para uma temperatura do ar de 15°C e água a 80°C. Esta potência tem de ser corrigida por um factor de correcção de potência (FP) dado pelo fornecedor do equipamento (eq. 6). Esta equação,

permite efectuar a correcção da potência, em cada instante, em função da diferença entre a temperatura da água e do ar que entram no termoventilador. Para além desta correcção de potência, só existe dissipação de calor pela estufa quando a parte da ventilação está a activa (AA, %).

$$FP = 0,0158\Delta T_{\text{água-ar}} - 0,0457 \quad (6)$$

No balanço de massa, a determinação dos coeficientes combinou a metodologia utilizada por Perales *et al* (2004), Perdígones *et al* (2005 e 2008b) e por Jolliet (1994), dado que a componente da evapotranspiração foi determinada por métodos estatísticos, sendo os restantes valores determinados em função do balanço de energia, ou seja, dos fluxos de energia, calculados e ajustados, para a estufa em estudo. Da junção destas equações resultou a seguinte equação:

$$C_{ai(t)} = C_{ai(t-1)} + A_2 R_s + B_2 (DPV) + \Psi_n + \Psi_p - \Psi_e - \Psi_j - \Psi_v \quad (7)$$

onde $C_{ai(t-1)}$ representa a concentração de vapor anterior (g kg^{-1}), A_2 o coeficiente relativo à evapotranspiração que está relacionado com a radiação solar ($\text{g kg}^{-1} \text{W}^{-1} \text{m}^2$), R_s a radiação solar (W m^{-2}), B_2 a componente da evapotranspiração ($\text{g kg}^{-1} \text{kPa}^{-1}$), que está relacionada com o DPV (kPa), Ψ_n os ganhos de vapor por nebulização de água (g kg^{-1}), Ψ_e as perdas de vapor pela cobertura (g kg^{-1}), Ψ_j e Ψ_v as perdas de vapor pela ventilação natural e dinâmica (g kg^{-1}) e Ψ_p os ganhos de vapor pela evaporação de água pelo painel evaporativo (g kg^{-1}).

Os fluxos de calor latente (Q_{La}) por evaporação de água pelo sistema de nebulização (Q_N) e painel evaporativo (Q_P), são agora transformados em fluxos de vapor de água, Ψ_n e Ψ_p respectivamente, pela transformação da equação proposta por Jolliet (1994) e Trigui *et al* (2001):

$$\Psi_{la} = \left(\frac{\frac{Q_{La}}{\lambda}}{V_g} \right) V_e t \times 10^3 \quad (8)$$

onde V_g representa o volume da estufa ($5.7375 \text{ m}^3 \text{m}^{-2}$), V_e o volume específico do ar seco em ($\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$), t o tempo entre leituras e 10^3 o factor de conversão de kg para g.

Segundo Albright (1990), o volume específico pode ser calculado de acordo com a seguinte equação:

$$V_e = \frac{1}{P} R_a T (1 + 1,6078r) \quad (9)$$

onde P representa a pressão atmosférica (Pa), R_a a constante do gás perfeito ($287,055 \text{ J kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$), T a temperatura em Kelvin e r a razão de mistura (kg kg^{-1}).

A transformação de outra equação também proposta por Jolliet (1994), permite agora a conversão dos fluxos de calor sensível (Q_{se} , W m^{-2}) em fluxos de massa (Ψ_{se} , g kg^{-1}). Como fluxos de calor sensível consideram-se as perdas pela cobertura (Q_{cc} , W m^{-2}), as perdas pelas janelas (Q_j , W m^{-2}) e pela ventilação dinâmica (Q_v , W m^{-2}).

$$\Psi_{se} = \left(\frac{\left(\frac{Q_{se}}{\Delta T} \right) (e_{ai} - e_{ae})}{\frac{\lambda \gamma}{V_g}} \right) V_e t \times 10^3 \quad (10)$$

Desta forma são determinadas as perdas de água pela cobertura (Ψ_e), pelas janelas (Ψ_j) e pela ventilação mecânica (Ψ_v).

Após o conhecimento da concentração de vapor no interior da estufa, pode-se calcular a humidade relativa (HR) utilizando a equação proposta por Perales *et al* (2003) e Coelho *et al* (2006):

$$HR_t = 21,325e^{-0,0602T_{is(t)}} C_{ais(t)} - (-0,0438T_{is(t)} + 0,7) \quad (11)$$

Os coeficientes foram extraídos nos 28 dias do mês de Fevereiro de 2010. Primeiro extraíram-se os coeficientes do balanço de energia e de seguida os do balanço de massa. Após a determinação de todos os coeficientes diários, foram calculadas as médias dos coeficientes obtidos e efectuada uma análise estatística (teste t) para verificar a existência de diferenças significativas entre os valores de ajustamento, em função da abertura de redes de sombra/térmicas.

A comparação entre os valores obtidos em função do ajuste do modelo e do estado de activação das redes, foi efectuada através do teste t de Student, utilizando o software SPSS v15.0.

Para a validação do modelo foi efectuada o teste ANOVA utilizando o software SPSS v15.0. Como medidas de ajustamento entre os valores medidos e simulados, foram utilizadas as diferenças médias absolutas e o erro padrão da estimativa (RMSE).

3 - Resultados e discussão

No quadro 1 encontram-se os resultados das expressões e os valores de ajustamento em função do estado de abertura de redes e de ajustamento dos modelos.

Existe uma clara influência das redes nos valores de ajustamento utilizados no modelo porque existem diferenças significativas ($P < 0,05$) entre os valores de ajuste com e sem redes para a maioria dos coeficientes. No entanto, não se verificaram diferenças significativas ($P > 0,05$) para o ajuste das perdas de condução e convecção pela cobertura (Φ_{cc}), ajuste do sistema de nebulização (Φ_n), ajuste do painel evaporativo (Φ_p) e para a componente da evapotranspiração relacionada com a radiação solar (Φ_{A2}). O painel evaporativo não teve funcionamento durante este período, logo não foi possível efectuar qualquer extracção de coeficientes.

A fracção de energia solar que é transformada em calor sensível é muito baixa devido aos baixos valores obtidos no coeficiente que conjuga esta energia com a transmissividade do material de cobertura (Φ_{Rs}). No entanto, o valor com redes (0,118) está acima dos valores utilizados e validados por Perales *et al.* (2003) e Perdignes *et al.* (2005) (0,075). Para a situação sem as redes, o coeficiente determinado é substancialmente inferior ao utilizado pelos autores acima referidos, dado que validaram o valor de 0,3 e o valor extraído neste

balanço foi de 0,197. Ao considerar-se um valor de transmissividade da cobertura média de 0,8825 (média dos valores apresentados por Waaijenberg, 1995 e Zabeltitz, 1999) a componente da radiação que é transformada em calor sensível situa-se entre os 22,3% sem redes e 13,4% com as redes de sombra estendidas. Pode-se também afirmar que a presença das redes reduz os ganhos de energia em aproximadamente 40%.

Quadro 1 - Coeficientes de ajustamento do modelo de aquecimento (valores com a mesma letra não são estatisticamente diferentes, $P > 0,05$).

Coeficientes	Equação de ajuste do coeficiente	Sem rede (0%)	Com rede (100%)
Q_{Rs} (adimensional)	$\Phi_{Rs} = -0,001x + 0,197$	0,197 ^a	0,118 ^b
Q_{cc} ($W\ m^{-2}\ ^{\circ}C^{-1}$)	$\Phi_{cc} = 4,02$	4,02 ^a	4,02 ^a
Q_a (adimensional)	$\Phi_a = 0,003x + 0,535$	0,535 ^b	0,818 ^a
Q_j (adimensional)	$\Phi_j = 0,005x + 0,361$	0,361 ^b	0,832 ^a
Q_v (adimensional)	$\Phi_v = 0,008x + 0,005$	0,005 ^b	0,844 ^a
Q_n (adimensional)	$\Phi_n = -0,001x + 0,994$	0,994 ^a	0,956 ^a
Q_p (adimensional)	$\Phi_p = 1$	1,000 ^a	1,000 ^a
C ($W\ m^{-2}\ ^{\circ}C^{-1}$)	$\Phi_{Ce} = -0,049x + 54,715$	54,715 ^a	49,847 ^b
A_2 ($g\ kg^{-1}\ W^{-1}\ m^2$)	$\Phi_{A2} = 2 \times 10^{-5}x + 0,001$	0,001 ^a	0,003 ^a
B_2 ($g\ kg^{-1}\ kPa^{-1}$)	$\Phi_{B2} = -0,004x + 0,861$	0,861 ^a	0,482 ^b

As perdas de energia do coeficiente global de perdas de energia pela estrutura (Φ_{cc}), não são influenciadas pelas redes de sombra/térmicas nesta altura do ano, e podem estar relacionados com o estado de funcionamento dos equipamentos e com as condições climáticas verificadas. As redes estão quase sempre estendidas, na medida em que fecham a temperaturas exteriores inferiores a 12°C, e o sistema de aquecimento está quase sempre a trabalhar. Durante o dia, com baixa intensidade de luz ($< 300\ W\ m^{-2}$), as redes estão estendidas, mas como a diferença entre a temperatura interior e exterior é mínima, as perdas pela cobertura são também mínimas.

De igual modo, a explicação dos valores extraídos para os ganhos de energia pelo sistema de aquecimento tem as mesmas justificações que foram estabelecidas para o coeficiente de perdas globais pela estrutura.

O aumento das perdas por ventilação com as redes estendidas, pode ser justificada com o aumento da temperatura acima destas, para o caso das janelas e, para a ventilação dinâmica este aumento pode ser justificado por um lado pela redução do volume da estufa e também pela menor temperatura do ar abaixo das redes.

Para a capacidade térmica da estufa (Φ_{Ce}), embora exista uma diferença mínima entre os valores, é muito influenciada pelas redes ($P < 0,05$).

Salienta-se que, o facto de se terem utilizado para o dia os dados das 24 horas de cada dia em avaliação, em vez de se utilizarem períodos específicos como os períodos de aquecimento durante a noite e princípio da manhã (Afonso, 2005), ou a ventilação natural durante o dia (Coelho, 2005), resulta na impossibilidade de não se poder efectuar melhores considerações sobre a eficiência de cada sistema em estudo.

Depois de extraídos os coeficientes do modelo de aquecimento, foram validados em 30 dias do mês de Janeiro 2010 (2 a 31) e sete dias no mês de Março de 2010. Da análise estatística entre os dados medidos e simulados, resultou que não existem diferenças significativas ($P > 0,05$) para a temperatura e humidade relativa. No quadro 6 encontram-se os valores médios obtidos nos 37 dias de validação e o respectivo desvio padrão (SD).

Quadro 2 - Resultados da análise estatística do modelo de aquecimento (ANOVA) (* Diferenças significativas $P < 0,05$).

	Valores medidos (média \pm SD)	Valores simulados (média \pm SD)	P
Temperatura, °C	17,97 \pm 0,70	18,13 \pm 0,75	0,347
Humidade Relativa, %	74,41 \pm 6,55	70,51 \pm 12,17	0,090

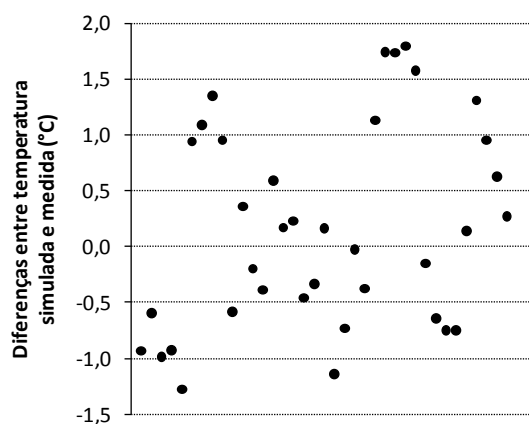


Figura 1 - Diferenças entre temperatura simulada e medida.

A média das diferenças absolutas de temperatura obtidas na validação deste modelo foi de 1,31°C. Da análise da figura 1 pode verificar-se que a variação dos valores se encontra entre -1,28 e +1,8. O erro padrão da estimativa (RMSE), outra medida de ajustamento, é de 0,91°C. Afonso (2005) em modelação do período de aquecimento (das 20 h às 11 h) obteve RMSE de 1,4°C e Baptista *et al* (2010) na aplicação de um modelo climático para estufas em Portugal com clima temperado, obteve um RMSE de 1,6°C na validação de um modelo considerando também as 24 horas do dia. Perdignes *et al* (2008b) nos seus estudos obtiveram erros médios absolutos entre 1,3 e 2,1°C.

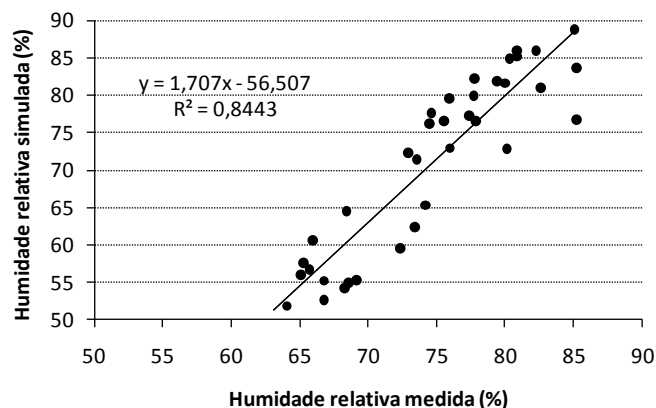


Figura 2 - Humidade relativa simulada versus medida.

Nas medidas de ajustamento da humidade relativa obtiveram-se os valores de 7,46% para a média das diferenças médias absolutas e 7,65% para o RMSE. Na figura 2 o R^2 indica que se consegue explicar 84% dos resultados simulados (y), em função da humidade medida (x), através da utilização da equação $y=1,707x-56,507$. Estes valores também estão de acordo com outros trabalhos publicados, nomeadamente, valores entre 3,7 e 4,2% (Afonso, 2005) e 6,98% (Baptista *et al*, 2010). Perdigones *et al*. (2008b) obtiveram diferenças absolutas de humidade relativa ente 5,7 e 8,8%.

Na figura 3 encontram-se os valores registados pelas sondas (interiores) e os valores interiores simulados pelo modelo durante 24 horas, entre o dia 21 e 25 de Janeiro de 2010. Nos primeiros quatro dias, as temperaturas médias exteriores estiveram acima dos 13°C, mas no dia seguintes, verificou-se um acentuado arrefecimento nocturno com temperaturas mínimas de aproximadamente 4°C.

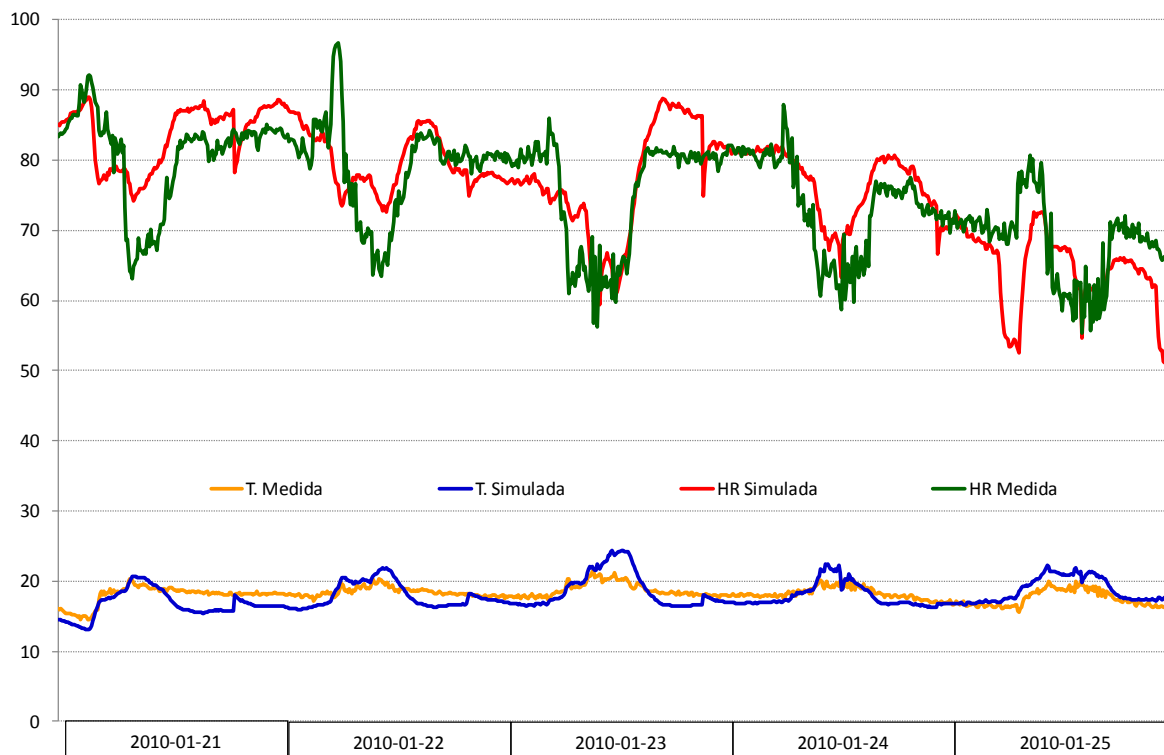


Figura 3- Valores medidos e simulados para a temperatura (T, °C) e humidade relativa (HR, %), no período de 21 a 25 de Janeiro de 2010.

Em síntese, os valores obtidos neste trabalho em condições normais de funcionamento, estão de acordo com os valores obtidos em outros trabalhos de modelação climática, muitas vezes em condições de ensaio com estratégias de controlo do ambiente pré-determinadas.

4 - Conclusões

Neste estudo foi desenvolvido e validado um modelo climático que permite estimar a temperatura e a humidade relativa para o período de Inverno - modelo de aquecimento.

Desta forma, é possível utilizar o modelo para prever a temperatura e a humidade relativa interior nesta estufa, com diferentes condições meteorológicas exteriores, assim como diferentes estratégias de controlo dos diversos equipamentos, verificação e teste dos diferentes objectivos de funcionamento dos equipamentos e ainda diferentes algoritmos de controlo. Para além destas importantes funções, os modelos podem também ser utilizados para a determinação das necessidades e custos energéticos da utilização da estufa, de acordo com os objectivos pretendidos. No entanto, consideramos que mais estudos deverão ser realizados no sentido de melhorar o ajuste do modelo.

Para além da utilização deste modelo nas condições do presente estudo, a metodologia utilizada na sua concepção permite que este seja adaptado a diferentes condições climáticas e a diferentes equipamentos de controlo ambiental de estufas, bastando para tal que sejam extraídos os novos coeficientes, obtendo-se um modelo ajustado às novas condições.

Em conclusão, considerando a grande dependência dos resultados da propagação vegetativa de *Eucalyptus globulus* Labill. relativamente às condições ambientais em que esta se processa, a utilização de modelos de controlo ambiental do interior da estufa é uma

ferramenta essencial, não só para a gestão destas mesmas condições, como também para a previsão dos custos energéticos que as diferentes estratégias de controlo ambiental e os diferentes valores objectivo assumem.

5 - Bibliografia

- Afonso, J. (2005). Utilização de sistemas de aquecimento por ar e por água quente em estufas. Trabalho fim curso de Engenharia Agrícola da Universidade de Évora. Évora. 89 pp.
- Albright, L. (1990). Environmental control for Animals and Plants. ASAE Textbook N.º4. The American Society of Agriculture Engineers. Michigan. 453 pp.
- ASHRAE. (2005). Thermodynamics and refrigeration cycles In: ASHRAE Handbook - Fundamentals, 1.1-1.21 pp.
- Baptista, F. (2007). Modelling the climate in unheated greenhouse and predicting *Botrytis cinerea* infection. PhD Thesis, Universidade de Évora. Évora, 180 pp.
- Baptista, F., Bailey, B., Meneses J. e Navas L. (2010). Greenhouse climate modelling. Tests, adaptation and validation of a dynamic climate model. Spanish Journal of Agricultural Research, 8:285-298.
- Coelho, M. (2005). Utilização de sistemas de aquecimento por ar e por água quente em estufas. Trabalho fim curso de Engenharia Agrícola da Universidade de Évora. Évora, 106 pp.
- Coelho, M., Baptista, F., Cruz, V. e Garcia, J. (2006). Comparison of four natural ventilation systems in a mediterranean greenhouse. Acta Horticulturae, 719:157-164.
- Joliet, O. (1994). Hortitrans, a model for predicting and optimizing humidity and transpiration on greenhouses. Journal of Agricultural Engineering Research, 57:23-37.
- Perales, A., Perdignes, A., Garcia, J., Montero, J., e Antón, A. (2003). El control de la condensación en invernaderos. Horticultura, 168:14-19.
- Perales, A. Garcia, J., Romero, A., Benavente, R. e Luna, L. (2004). Greenhouse relative control with heating and ventilation strategies. Proc. of International Symposium New trends in farm buildings, Évora.
- Perdignes, A., Garcia, J., Luna, L., Montero, J. e Miñoz, P. (2005). Comparative test and modelling of humidity control strategies in mediterranean greenhouse placed in continental and coastal sites. Acta Horticulturae, 691:195-202.
- Perdignes, A., Garcia, J., Romero, A., Rodríguez, A., Luna, L., Raposo, C. e Plaza, S. (2008a). Cooling strategies for greenhouse in summer: control of fogging by pulse with modulation. Biosystems Engineering, 99:573-586.
- Perdignes, A. Valiño, V., Garcia, J., Baptista, F., Montero, J., Benavente, R. e Plaza, S. (2008b). Experimental results and modelling of humidity control strategies for greenhouse in continental and coastal settings in the Mediterranean region. I: Experimental results and model development. Spanish Journal of Agricultural Research, 6:189-198.
- Stanghellini, C. e Meurs, W. (1992). Environmental controlo of greenhouse crop transpiration. Journal of Agricultural Engineering, 51:297-311.
- Trigui, M., Barrington, S. e Gauthier, L. (2001). A strategy for greenhouse climate control, Part I: Model development. Journal of Agricultural Engineering Research, 78:407-413.

- Waaijenbergh, D. (1995). Greenhouse construction and equipment - Construction. In Greenhouse Climate Control. An integrated approach. Eds. J.C. Bakker, G.P.A. Bot, H. Challa and N.J. Van de Braak. Wageningen Pers, Wageningen, 279 pp.
- Zabelitz, C. (1999). Greenhouse structures. In Greenhouse Ecosystems, Eds. G. Stanhill and H. Zvi Enich, Elsevier, 423 pp.

Anexo 2

Matriz dos factores carregados nas duas componentes principais do efeito das condições climáticas da zona dos pés-mãe na produção de rebentos.

	Componente	
	1,000	2,000
Semana	0,193	0,426
GM258PRO	0,690	-0,152
BC422PRO	0,473	-0,247
AC58PRO	0,686	-0,016
YG15PRO	0,553	-0,116
MedT	0,941	0,294
MaxT	0,964	0,205
MinT	0,881	0,392
MedHR	-0,284	0,910
MaxHR	0,427	0,635
MinHR	-0,547	0,611
MedDPV	0,965	-0,194
MaxDPV	0,926	-0,141
MinDPV	0,404	-0,508
NHDia	0,944	-0,154
MedTDia	0,860	0,361
MedHRDia	-0,685	0,599
MedDPVDia	0,911	-0,093
NHNoite	-0,944	0,154
MedTNoite	0,846	0,396
MedHRNoite	0,683	0,405
MedDPVNoite	-0,105	-0,662
DifT	0,495	0,163
DifHR	-0,821	0,195
DifDPV	0,894	-0,019
SumRad	0,946	-0,245
RadGlob	0,946	-0,245
RadMed	0,929	-0,284
RadMax	0,962	-0,182
RadPARMed	0,929	-0,284
RadPARMax	0,962	-0,182
RadumolMed	0,929	-0,284
RadumolMax	0,962	-0,182
EstacaoAno	0,255	0,479

	Componente	
	1,000	2,000
Tx16	-0,916	-0,250
T16x19	-0,816	-0,364
T19x22	0,670	0,571
T22x25	0,955	-0,062
Tx25	0,894	0,347
HRx60	0,332	-0,785
HR60x70	0,571	0,371
HR70x80	-0,824	-0,455
HR80x90	0,221	0,874
HRx90	0,422	0,410
DPCx035	-0,699	0,504
DPV035x050	-0,088	-0,681
DPV050x065	-0,804	-0,342
DPV065x080	-0,233	0,005
DPVx080	0,988	-0,047

Anexo 3

Matriz dos factores carregados nas duas componentes principais do efeito das condições climáticas da zona dos pés-mãe no enraizamento.

	Componente	
	1,000	2,000
Semana	0,325	0,479
GM258PRO	0,834	0,121
BC422PRO	0,422	0,164
AC58PRO	0,806	-0,208
YG15PRO	-0,191	0,305
MedT	0,940	0,312
MaxT	0,963	0,214
MinT	0,880	0,409
MedHR	-0,262	0,933
MaxHR	0,258	0,728
MinHR	-0,455	0,679
MedDPV	0,968	-0,214
MaxDPV	0,913	-0,173
MinDPV	0,565	-0,527
NHDia	0,933	-0,152
MedTDia	0,887	0,358
MedHRDia	-0,562	0,731
MedDPVDia	0,917	-0,118
NHNoite	-0,933	0,152
MedTNoite	0,813	0,441
MedHRNoite	0,591	0,510
MedDPVNoite	-0,117	-0,637
DifT	0,611	0,130
DifHR	-0,774	0,238
DifDPV	0,899	-0,040
SumRad	0,933	-0,261
RadGlob	0,933	-0,261
RadMed	0,906	-0,322
RadMax	0,949	-0,202
RadPARMed	0,906	-0,322
RadPARMax	0,949	-0,202
RadumolMed	0,906	-0,322
RadumolMax	0,949	-0,202
EstacaoAno	0,339	0,500
Tx16	-0,915	-0,260
T16x19	-0,804	-0,388
T19x22	0,626	0,612
T22x25	0,952	-0,075

	Componente	
	1,000	2,000
Tx25	0,889	0,365
HRx60	0,271	-0,818
HR60x70	0,577	0,402
HR70x80	-0,793	-0,485
HR80x90	0,161	0,899
HRx90	0,412	0,452
DPCx035	-0,734	0,508
DPV035x050	0,040	-0,708
DPV050x065	-0,765	-0,385
DPV065x080	-0,333	0,065
DPVx080	0,991	-0,054

Anexo 4

Matriz dos factores carregados nas duas componentes principais do efeito das condições climáticas da zona de enraizamento no enraizamento.

	Componente	
	1,000	2,000
Semana	0,208	0,886
GM258PRO	0,779	0,135
BC422PRO	0,378	0,110
AC58PRO	0,806	-0,004
YG15PRO	-0,282	0,405
MedT	0,891	0,267
MaxT	0,965	0,146
MinT	0,850	0,261
MedHR	0,980	0,162
MaxHR	0,942	-0,023
MinHR	0,599	0,709
MedDPV	-0,941	-0,084
MaxDPV	0,654	-0,586
MinDPV	-0,875	0,097
NHDia	0,832	-0,505
MedTDia	0,897	0,323
MedHRDia	0,829	0,411
MedDPVDia	-0,747	-0,180
NHNoite	-0,832	0,505
MedTNoite	0,639	0,415
MedHRNoite	0,829	-0,044
MedDPVNoite	-0,938	0,046
DifT	0,885	0,159
DifHR	0,014	0,450
DifDPV	0,843	-0,139
SumRad	0,817	-0,555
RadGlob	0,817	-0,555
RadMed	0,771	-0,580
RadMax	0,779	-0,462
RadPARMed	0,771	-0,580
RadPARMax	0,779	-0,462
RadumolMed	0,771	-0,580
RadumolMax	0,779	-0,462
EstacaoAno	0,350	0,824
Tx16	-0,766	-0,059
T16x19	-0,750	-0,596
T19x22	0,130	0,711
T22x25	0,842	0,322

	Componente	
	1,000	2,000
Tx25	0,843	0,083
HRx60	-0,840	-0,421
HR60x70	-0,980	-0,054
HR70x80	0,665	0,461
HR80x90	0,985	-0,020
HRx90	0,742	0,007
DPCx035	0,864	-0,166
DPV035x050	0,886	0,185
DPV050x065	0,331	0,506
DPV065x080	-0,949	-0,068
DPVx080	-0,061	-0,628